
BACHELORARBEIT

Herr
Alexander Kratsch

Glätten von Mikrostrukturen in Quarzglas mittels CO₂- Laser

Mittweida, 2011

BACHELORARBEIT

Glätten von Mikrostrukturen in Quarzglas mittels CO₂-Laser

Autor:

Herr

Alexander Kratsch

Studiengang:

Physikalische Technik

Seminargruppe:

PT08wP-B

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. (FH) Michael Pfeifer

Einreichung:

Mittweida, 01.11.2011

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2011

BACHELORTHESIS

CO₂ laser smoothing of microstructured fused silica

author:

Mr.

Alexander Kratsch

course of studies:

Physical Engineering

seminar group:

PT08wP-B

first examiner:

Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel

second examiner:

Dipl.-Ing. (FH) Michael Pfeifer

submission:

Mittweida, 01.11.2011

Bibliografische Beschreibung:

Kratsch, Alexander:

Glätten von Mikrostrukturen in Quarzglas mittels CO₂-Laser. - 2011. - XI, 57, xiv S.
Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Mathematik / Naturwissenschaften /
Informatik, Bachelorarbeit, 2011

Referat:

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, inwiefern eine Glättung einer mikrostrukturierten Quarzglasoberfläche durch die Verwendung von Laserstrahlung möglich ist. Es werden generelle Umsetzbarkeit, Grenzen des Verfahrens und die optimalen Parameter diskutiert. Das Ziel der Untersuchungen ist die Beseitigung der Bearbeitungsspuren, welche bei der Herstellung von diffraktiven optischen Elementen mittels Lasermikrostrukturierung entstehen.

Danksagungen

Mein persönlicher Dank gilt allen die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben. Allen voran Prof. Weißmantel und Dipl.-Ing. (FH) Pfeifer, die mir nicht nur mit fachlichem Rat weiter geholfen haben, sondern auch die Mittel bereit gestellt haben, welche für die Untersuchungen nötig waren. Ebenso möchte ich dem gesamten Team des Laserinstituts der Hochschule Mittweida danken, das mit Rat und Tat zur Seite stand. Besondere Erwähnung soll an dieser Stelle der Beitrag von Annika Richmann und Konrad Wissenbach finden, welche mir die Ergebnisse ihrer Arbeit zu Thema „Laserpolieren von Optiken aus Glas und Kunststoff“ zur Verfügung gestellt haben. Diese bildeten eine wichtige theoretische Grundlage für die Erstellung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	X
Abkürzungsverzeichnis.....	X
Formelzeichen.....	XI
1. Einleitung.....	1
1.1. Aufgabenstellung.....	2
1.2. Stand der Technik.....	3
1.2.1. Aktuelle Glättungsverfahren für Optiken.....	3
2. Grundlagen.....	6
2. 1. Diffraktive Optische Elemente.....	6
2. 2. Thermische Eigenschaften von Quarzglas.....	14
2. 3. Thermisches Glätten mittels Laser.....	16
3. Material und Methoden.....	19
3.1. F2-Laser LPF 220i.....	19
3. 2. CO2-Laser FEHA SM600P.....	22
3.2.1. Funktionsweise und Eigenschaften der Strahlquelle.....	22
3. 2. 2. Versuchsaufbau für den Laser FEHA SM600P.....	23
3. 3. CO2-Laser Synrad 57-2	26
3. 4. Die Teststrukturen.....	28
3.5. Theorie der Kantenverrundung.....	33
4. Ergebnisse und Diskussion.....	35
4.1. Kriterien für eine erfolgreiche Glättung.....	35
4.1.1. Schwellleistung.....	35
4.1.2. Deformation und thermische Spannungen.....	39
4.1.3. Gleichmäßige und durchgängige Glättung.....	41
4.2. Glättungsversuche.....	43
4.2.1. Glättungsversuche an einer aufgerauten Quarzglasoberfläche.....	43
4.2.2. Glättungsversuche an den Test-DOEs.....	47
4.2.3. Auswirkung der Glättung auf optische Eigenschaften	51
4.3. Kantenverrundung der DOE-Struktur.....	54
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	57
Literaturverzeichnis.....	i
Anhang.....	iv
Selbstständigkeitserklärung.....	xiv

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Polierschale für sphärische Flächen [BLI].....	3
Abbildung 2: Prinzip FJP [BLI].....	4
Abbildung 3: Prinzip IBF [BLI].....	4
Abbildung 4: Prinzip Ultraschallschwingläppen [BLI]; [GRO].....	5
Abbildung 5: Brechung und Reflexion.....	6
Abbildung 6: Raytracing zweier Strahlenbündel für ein Lithografieobjektiv [ITM].....	7
Abbildung 7: Größen im Beugungsintegral.....	7
Abbildung 8: Beugungszonen [DAI].....	9
Abbildung 9: Intensität des Beugungsmusters einer Rechteckblende (Quelle : Wikipedia).....	10
Abbildung 10: Transmissionsgitter (links); Reflexionsgitter (rechts).....	11
Abbildung 11: Herstellung einer Achtstufigen DOE-Struktur in 3 Lithografieschritten [DAI].....	11
Abbildung 12: Beugungsbild eines Gitters mit Maskenversatz.....	12
Abbildung 13: Einfluss der Höhenfehler auf das Beugungsbild.....	13
Abbildung 14: Temperaturabhängigkeit des Volumens bei Glas [BRO].....	14
Abbildung 15: Viskosität von Glas in Abhängigkeit der Temperatur [BRO].....	14
Abbildung 16: Prinzip der thermischen Glättung [ILT 1].....	16
Abbildung 17: Fourier-Transformation des Oberflächenprofils.....	17
Abbildung 18: Rauheiten R_a bei verschiedenen Oberflächenwellenlängen und t_{int} [ILT 2].....	18
Abbildung 19: Lasergeglättete Linse im Vorher-Nachhervergleich [ILT 3].....	18
Abbildung 20: Laser LPF 200i Strahlquelle [BER].....	19
Abbildung 21: Strahlengang des F2-Lasers [BER].....	20
Abbildung 22: Maske [BER].....	21
Abbildung 23: Maskenrahmenhalter.....	21
Abbildung 24: Laser FEHA SM600P, Strahlquelle.....	22
Abbildung 25: Versuchsaufbau für FEHA SM600P.....	23
Abbildung 26: Designvorschlag für Substrathalter.....	24
Abbildung 27: Abbildung eines Gaußstrahls.....	24
Abbildung 28: Versuchsaufbau für Synrad 57-2.....	26
Abbildung 29: Leistung von Synrad 57-2 bei verschiedenen Aussteuerungen (Anl. 1). 27	27
Abbildung 30: Mit Schleifpapier aufgeraute Quarzglasoberfläche.....	28
Abbildung 31: Abtragsraten für Corning 7980 [BER].....	29
Abbildung 32: Test-DOE 1.....	29
Abbildung 33: Test-DOE 2.....	30
Abbildung 34: Substruktur der Oberfläche von Test-DOE 4.....	31

Abbildung 35: Test-DOE 3.....	31
Abbildung 36: Test-DOE 3.....	31
Abbildung 37: Test-DOE 4.....	32
Abbildung 38: Oberflächenrauheiten vor der Laserbehandlung (s. Anl. 2).....	32
Abbildung 39: Kantenfunktion und Wichtungsfunktion.....	33
Abbildung 40: Typische Kantenform nach der Glättung für unterschiedliche β	34
Abbildung 41: Entstehendes Temperaturfeld bei schneller Rasterung.....	35
Abbildung 42: mäanderförmige Rasterung eines Feldes.....	36
Abbildung 43: Abtragsschwellen für Synrad 57-2 (s. Anl. 3).....	37
Abbildung 44: Glasplatte nach Laser-behandlung mit verschiedenen Leistungen.....	37
Abbildung 45: Anordnung der Testflächen auf dem Substrat.....	37
Abbildung 46: Oberflächenprofil bei Überschreitung der Schwellleistung.....	38
Abbildung 47: Vorderseite des deformierten Substrates.....	39
Abbildung 48: Rückseite.....	39
Abbildung 49: Deformation durch Lasereinwirkung 1.....	39
Abbildung 50: Deformation durch Lasereinwirkung 2.....	40
Abbildung 51: Deformation durch Lasereinwirkung 3.....	40
Abbildung 52: Deformation durch Lasereinwirkung 4.....	40
Abbildung 53: Testfelder auf einer aufgerauten Quarzglasoberfläche.....	41
Abbildung 54: Rauheiten der aufgerauten Oberfläche (s. Anl. 4).....	43
Abbildung 55: Oberflächenrauheiten nach GÜF (s. Anl. 5).....	43
Abbildung 56: $R_{a\text{ nach}} / R_{a\text{ vor}}$ für Synrad 57-2.....	44
Abbildung 57: Testfelder der Glättungsversuche mit FEHA SM600P.....	45
Abbildung 58: Temperaturverläufe in der Mitte der Testfelder.....	45
Abbildung 59: Abhängigkeit der mittleren Oberflächenrauheit von der Erreichten Maximaltemperatur (Anl. 10).....	45
Abbildung 60: Durch Lasereinwirkung deformiertes Substrat.....	46
Abbildung 61: Glättung von Test-DOE 1 Fläche 1	47
Abbildung 62: Glättung von Test-DOE 1 Fläche 2.....	47
Abbildung 63: mittlere Oberflächenrauheiten von Test-DOE 1 Fläche 1 (s. Anl. 6).....	48
Abbildung 64: mittlere Oberflächenrauheiten von Test-DOE 1 Fläche 2 (s. Anl. 7).....	48
Abbildung 65: Glättung von Test-DOE 2 Fläche 2.....	49
Abbildung 66: Welligkeit und Strukturierungsfehler von Fläche 2.....	49
Abbildung 67: mittlere Oberflächenrauheiten von Test-DOE 1 Fläche 1 (s. Anl. 8).....	50
Abbildung 68: mittlere Oberflächenrauheiten von Test-DOE 1 Fläche 2 (s. Anl. 9).....	50
Abbildung 69: optische Antwort von Test-DOE 3 vor der Laserbehandlung.....	51
Abbildung 70: optische Antwort von Test – DOE 4 vor der Laserbehandlung.....	51
Abbildung 71: Entstehung des Beugungsbildes.....	52
Abbildung 72: Test-DOE 3 nach 3 GÜF.....	52

Abbildung 73: Test-DOE 4 nach 3 GÜF.....	52
Abbildung 74: Test-DOE 3 nach 10 GÜF.....	53
Abbildung 75: Test-DOE 4 nach 10 GÜF.....	53
Abbildung 76: Optische Antwort ohne Glättung und ohne Substruktur.....	53
Abbildung 77: typische Kantenform nach der Glättung.....	54
Abbildung 78: Theoretische und reale Kantenform im Vergleich.....	54
Abbildung 79: Kante der Abmessung $h \times b$	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Daten des F2-Lasers LPF 220i [LPF].....	19
Tabelle 2: Komponenten des Strahlenganges [LPF].....	20
Tabelle 3: Daten des CO ₂ -Lasers FEHA SM600P [FEH].....	23
Tabelle 4: Komponenten im Versuchsaufbau für FEHA SM600P.....	24
Tabelle 5: Daten des CO ₂ -Lasers Synrad 57-2.....	27
Tabelle 6: Bearbeitungsparameter der Testfelder in Abb. 54.....	42
Tabelle 7: ermittelte Werte h und b vor der Glättung.....	55

Abkürzungsverzeichnis

Neben den im Duden zu findenden Abkürzungen werden zusätzlich folgende verwendet:

Anl.	Anlage
CaF ₂	Strukturformel für Kalziumfluorid
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Strukturformel für Kohlenstoffdioxid
F ₂	Strukturformel für Fluor
Gl.	Gleichung
GÜF	Glättungsüberfahrt(en)
ILT	Fraunhofer Institut für Lasertechnik Aachen
ppb	parts per billion (dt.: Teile pro Milliarde)
ppm	parts per million (dt.: Teile pro Million)
ÜLP	Pulsüberlapp
ÜF	Überfahrt des Lasers über eine abzurasternde Fläche bei pulsweiser Strukturierung
ZnSe	Strukturformel für Zink-Selenid

Formelzeichen

β	Glättungsparameter
ε	Eintrittswinkel
ε'	Austrittswinkel
θ	Divergenzwinkel des Strahls
ρ	Begungswinkel bei Beugung am Gitter
λ	Wellenlänge
a	Abstand / Abmessung
b	Breite
d	Höhenstufe
E	Elektrische Feldstärke
f	Brennweite der Zylinderlinse
f_b	Blendenfunktion
f_L	Laserfrequenz
fl	Leistungsfaktor der Maximalleistung von Synrad 57-2 [0...1]
f_M	Brennweite der sphärischen Linse
h	Höhe
k	Kreiswellenzahl
k_0	normierter Wellenzahlvektor
l	Messlänge für die mittlere Oberflächenrauheit
M^2	Strahlparameterprodukt
n_1, n_2	Brechzahlen der Stoffe 1 und 2
P	Leistung
p	Gitterperiode
q	Zeilenabstand bei der mäanderförmigen Rasterung einer Fläche
r	optische Weglänge einer Elementarwelle
R_a	mittlere Oberflächenrauheit
t_{int}	Interaktionszeit
$\dot{U}LP$	Pulsüberlapp [0...1]
v	Vorschub
v_{fl}	Flächengeschwindigkeit
w	Strahlradius des Laserstrahls
w_0	Strahlradius in der Strahltaile des Lasers
$w(z)$	Strahlradius im Abstand z zur Strahltaile
x, y, z	Kartesisches Koordinaten
x', y', z'	Kartesisches Koordinaten in der Abbildungs
z_0	Abstand Blende – Schirm

1. Einleitung

Ein Laser sei „eine Lösung, die nach einem Problem sucht“ [NYT 07], meinte Theodore Maiman, nachdem er den ersten funktionstüchtigen Laser der Welt 1960 konstruiert hatte, über seine eigene Erfindung. Eine Einstellung die viele seiner Kollegen zu damaliger Zeit teilten. Die einzigartigen Eigenschaften der Laserstrahlung, wie geringe Bandbreite, hohe Kohärenz, geringe Divergenz und die Möglichkeit, hohe Leistungen auf kleinen Raum zu fokussieren, offenbarten schnell die große Palette der Anwendungsmöglichkeiten von Lasern. Zum Beispiel ermöglichen sie nanometergenaues Vermessen und Ausrichten dank Interferometrie. Aber auch Schneiden, Schweißen und Beschriften gehören zu den etablierten Anwendungen, da gerade in Verbindung mit Computer gestützten Bewegungsabläufen eine hohe Präzision und Flexibilität erreicht werden kann.

Laserstrahlung kann auf vielfältige Weise mit einer Oberfläche wechselwirken, von einfachem Erwärmen oder Lumineszenz bis hin zum Materialabtrag (Ablation). Diese Vielfältigkeit ist es, die den Laser bis heute zu einem beliebten Forschungsobjekt an Hochschulen und Universitäten macht.

Eine der in den letzten Jahren erforschten Anwendungen ist die Lasermikrostrukturierung von wide bandgap Materialien, welche über Multiphotonenabsorption mittels Ultrakurzpulslaser oder Excimerlaser erreicht werden kann. Bei beiden Methoden bleibt die im Substrat deponierte Energie am Ort der Laserinteraktion mit dem Material, wobei die wärmebeeinflusste Zone vernachlässigbar klein ist. Die bei jedem Puls nahezu gleich bleibende Abtragsrate und berechenbare Abtragstiefe ermöglichen das schichtweise Herausarbeiten komplexer Strukturen. Eine auf diese Weise strukturierte Fläche weist eine charakteristische Oberflächenstruktur auf. Ähnlich wie beim Fräsen hinterlässt eine pulsweise Strukturierung, bedingt durch den Pulsversatz, eine charakteristische Oberflächenstruktur. Ziel dieser Arbeit soll es sein, diese Bearbeitungsspuren zu beseitigen, sodass eine optisch glatte Oberfläche entsteht. Dies würde die Möglichkeit bieten diffraktive optische Elemente und Mikrooptiken ohne zeitaufwendige Ätzprozesse herzustellen.

Das Glättungsverfahren sollte von der Oberflächenform unabhängig sein und diese nicht zerstören, deshalb wurde das Verfahren der thermischen Glättung gewählt bei dem kein Material abgetragen wird. Dabei glättet sich die Oberfläche durch die Oberflächenspannung ihrer flüssigen Phase. Um die benötigte thermische Energie für den Phasenübergang in eine dünne Schicht des Substrates einzubringen, soll ebenfalls ein Laser verwendet werden.

Diese Art der Oberflächenbearbeitung eignet sich nicht nur für die Behandlung von Phasenplatten, sondern bei richtiger Anwendung auch für die Endbearbeitung von Freiformprismen und asphärische Linsen.

Eine erfolgreiche Glättung einer DOE-Oberfläche (DOE - diffraktives optisches Element) könnte die Palette möglicher Laserbearbeitungsverfahren erweitern um die Lasermikrostrukturierung als Konkurrenz-verfahren zu mehrstufigen Ätzungen und das thermisches Glätten optischer Oberflächen mittels Laserstrahlung etablieren.

1.1. Aufgabenstellung

Die für die Anfertigung dieser Arbeit gestellten Aufgaben zum Thema „Glätten von Mikrostrukturen in Quarzglas mittels CO₂-Laser“ umfasst folgende Aufgabenbereiche:

Für eine optimale Untersuchung der CO₂-Laserglättung sollen Testfeld-Strukturen entworfen werden. Diese werden mittels F₂-Laser hergestellt. Die Strukturen sollen hinsichtlich ihrer Oberflächenrauheit durch optische Digitalmikroskopie und Oberflächenprofilometrie untersucht werden.

Es soll eine Parameterstudie zur optimalen Glättung der Strukturen mittels CO₂-Laser durchgeführt werden, sowie der Nachweis einer erfolgreichen Glättung mittels der oben genannten Analyseverfahren erbracht werden.

Das Verfahren des CO₂-Laserglättens soll hinsichtlich der Glättung von Phasenplatten optimiert werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den besonderen Anforderungen durch Abstufung der einzelnen Felder zueinander und Effekten an Kanten. Zusätzlich soll untersucht werden, inwiefern das Glättungsverfahren durch die Verwendung einer Substratheizung optimiert werden kann.

1.2. Stand der Technik

1.2.1. Aktuelle Glättungsverfahren für Optiken

Da es in dieser Arbeit vornehmlich um das Glätten von mittleren Rauheiten $R_a < 2 \mu\text{m}$ geht, sollen an dieser Stelle die im Einsatz befindlichen Glättungsverfahren diskutiert werden, welche in der Fertigungskette von Optiken nach dem Formschleifen bzw. Feinschleifen stehen. Nach diesen besitzt das Werkstück eine Rautiefe $R_q < 4 \mu\text{m}$ [BLI], danach schließt sich in der Regel Polieren an.

Am weitesten verbreitet ist das Polieren mit flächenförmigem Eingriff. Dabei erfolgt eine Relativbewegung zwischen dem Werkstück und einer visko-elastischen Polierschale oder -Scheibe (s. Abb. 1).

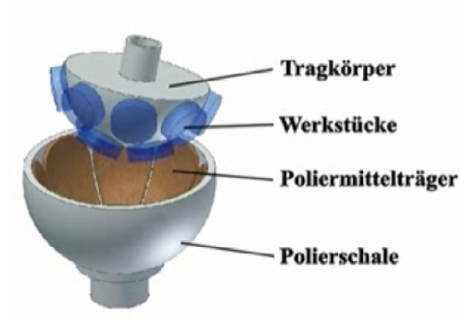


Abbildung 1: Polierschale für sphärische Flächen [BLI]

Da diese Art des Polierens ungeeignet ist für die Politur von unregelmäßig geformten Oberflächen, soll darauf nicht weiter eingegangen werden. Im Folgenden werden ausschließlich Verfahren erläutert, die auch für die Glättung diffraktiver optischer Elemente (DOEs) in Frage kommen. Es handelt sich dabei um Techniken, die für die Politur von asphärischen Linsen und Freiformoptiken oder die Nachkorrektur von hochpräzisen Optiken, wie etwa astronomischen Spiegeln, verwendet werden [BLI].

a.) Fluid-Jet-Polieren (FJP)

Dabei wird ein Poliersuspensionsstrahl auf die Werkstücksoberfläche gerichtet. Bei dieser Bearbeitungsart findet ein Abtrag von Material statt, wobei die Abtragsrate neben der Materialart auch von der Durchflussmenge, der Poliermittelart und -Konzentration abhängt [BLI].

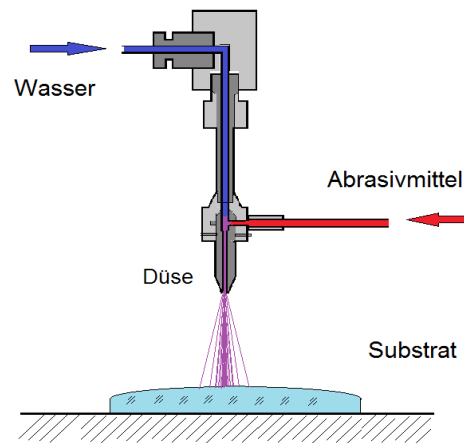


Abbildung 2: Prinzip FJP [BLI]

b) IBF-Polieren (Ion beam figuring)

Es handelt sich hierbei um eine High -End-Technologie für die Endbearbeitung von Optiken mit höchsten Anforderungen an die Oberflächenqualität. Sie findet Verwendung im Bereich der HL-Optiken oder Teleskopen, zur Polierfehlerkorrektur oder Erzeugung von Nanometersphären [BLI].

Dabei werden Inertgas-Ionen (z.B. neutralisierte Argon-Ionen) beschleunigt und auf einen Punkt auf der Oberfläche fokussiert. Meistens wird mit einem gaußförmig verteilten Ionenstrahl gearbeitet. Über die Vorschubgeschwindigkeit wird der Abtrag genau definiert, wobei die erreichbaren Oberflächengenauigkeiten im nm-Bereich liegen und die erreichbaren Oberflächenrauheiten im 0,1 nm-Bereich.

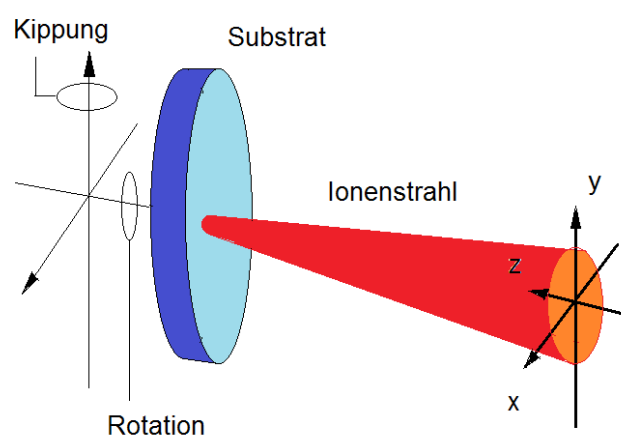


Abbildung 3: Prinzip IBF [BLI]

c) Ultraschallschwingläppen

In einigen Quellen wird dieses Verfahren auch als Ultraschallerosion bezeichnet [GRO]. Läppen stellt zwar kein Endbearbeitungsverfahren für optische Oberflächen dar, aber da es sich sowohl für die Bearbeitung als auch für die Herstellung von Phasenplatten eignet, sei es an dieser Stelle erwähnt.

Eine hochfrequente Schwingung wird mittels eines Piezo-Kristalls auf das Formwerkzeug übertragen. Zwischen Werkzeug und Werkstück befindet sich eine Läppemulsion, wobei die Korngröße entscheidenden Einfluss auf die Oberflächenrauheit nach der Bearbeitung hat: Je kleiner das Korn desto geringer die Rauheit.

Durch die Schwingung und die auf die Oberfläche wirkende Kraft werden kontinuierlich kleine Partikel aus dem Werkstück gebrochen. Bei diesem Prozess bildet sich das Formwerkzeug in der Substratoberfläche ab.

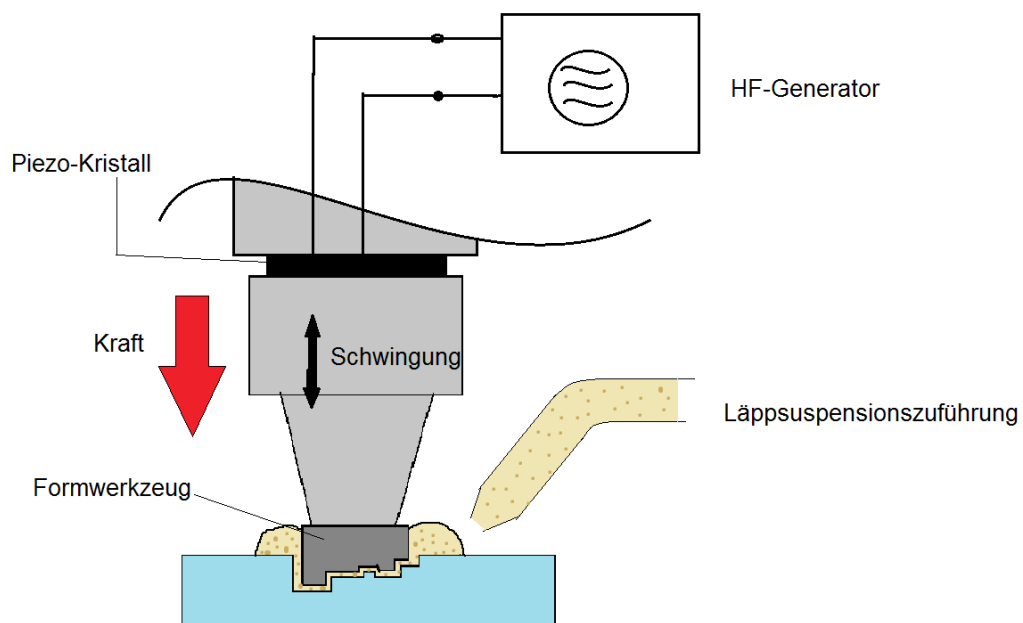


Abbildung 4: Prinzip Ultraschallschwingläppen [BLI]; [GRO]

Dieses Verfahren erlaubt die Herstellung von Mikrostrukturen von weniger als 0,1 mm bei relativ großem Aspektverhältnis.

2. Grundlagen

2. 1. Diffraktive Optische Elemente

Diffraktive optische Elemente halten zunehmend Einzug in verschiedene Bereiche der Optikanwendungen. Ihr Vorteil liegt in der Miniaturisierung und Gewichtseinsparung gegenüber konventionellen Optiken, da eine dünne Phasenplatte die Aufgaben ganzer Linsensysteme übernehmen kann, wie zum Beispiel die Korrektur von chromatischen Bildfehlern [ZEI]. DOEs lassen sich ebenfalls zur Strahlformung von Laserstrahlung verwenden. So kann ein elliptisches Gaußprofil in ein quadratisches Top-Hat-Profil umgewandelt werden. Gerade bei Laserstrahlung, für die es nur teiltransmittive Optiken gibt, wie etwa ZnSe-Linsen für CO₂-Laser oder CaF₂-Linsen für F₂-Laser, ist die Verwendung von Phasenplatten effektiv, da die Absorptionsverluste im Strahlengang reduziert werden.

Im Folgenden soll kurz der Vergleich zwischen konventionellen Optiken und diffraktiven Elementen angestellt werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der theoretischen Grundlage, welche die Schwierigkeiten und besonderen Anforderungen an DOEs bzgl. ihrer Fertigung gegenüber konventionellen Optiken aufzeigen. Diese funktionieren nach dem Prinzip der Refraktion und Reflexion. Für die Berechnungsgrundlage derartiger Systeme werden die Gesetze der Strahlenoptik herangezogen, dabei wird das Licht als ein oder mehrere Bündel von Strahlen betrachtet. Für das Verhalten dieser Strahlen an Grenzflächen gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:

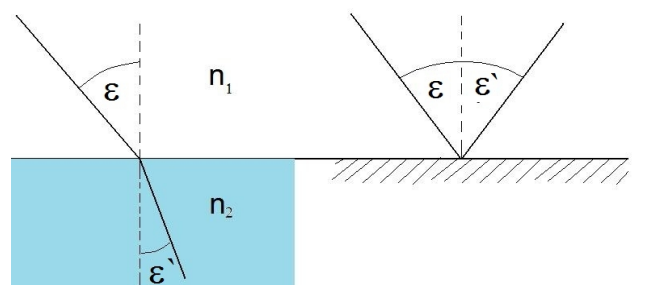


Abbildung 5: Brechung und Reflexion

Wobei für die Brechung gilt:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \epsilon'}{\sin \epsilon} \quad [1.1]$$

und für die Reflexion:

$$\epsilon = \epsilon' \quad [1.2]$$

In Verbindung mit der Methode des Raytracings (deutsch = Strahlverfolgung) können mit Hilfe dieser Gesetze komplexe optische Systeme berechnet werden. Dabei wird der Weg eines jeden Strahls im Strahlengang verfolgt und seine Richtungsänderung an Grenzflächen berechnet.

Zu den kompliziertesten optischen Systemen zählen Lithografieobjektive für die Herstellung von Mikroprozessoren. Diese bestehen aus über zehn Linsen, die alle nanometergenau gefertigt und justiert werden müssen (s. Abb. 6).

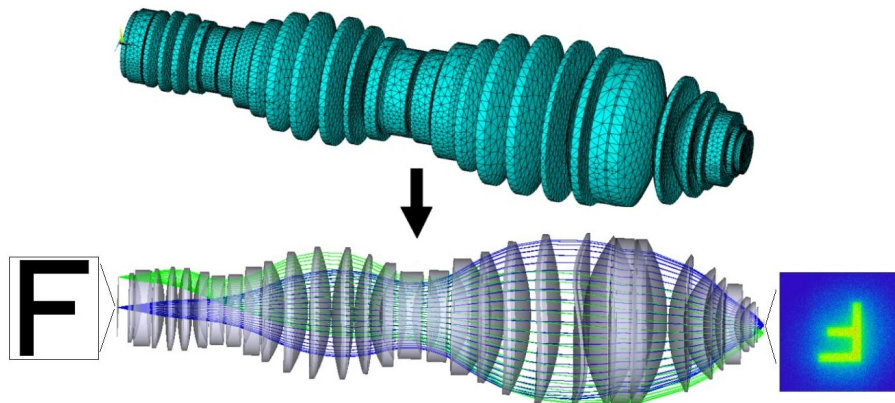


Abbildung 6: Raytracing zweier Strahlenbündel für ein Lithografieobjektiv [ITM]

Für die Berechnung diffraktiver optischer Elemente wird hingegen die Wellenoptik benötigt. Diese betrachtet elektromagnetische Strahlung als eine Welle, deren Amplitude an einem Ort sich aus der Überlagerung (Interferenz) aller dort eintreffenden Elementarwellen ergibt [KIE].

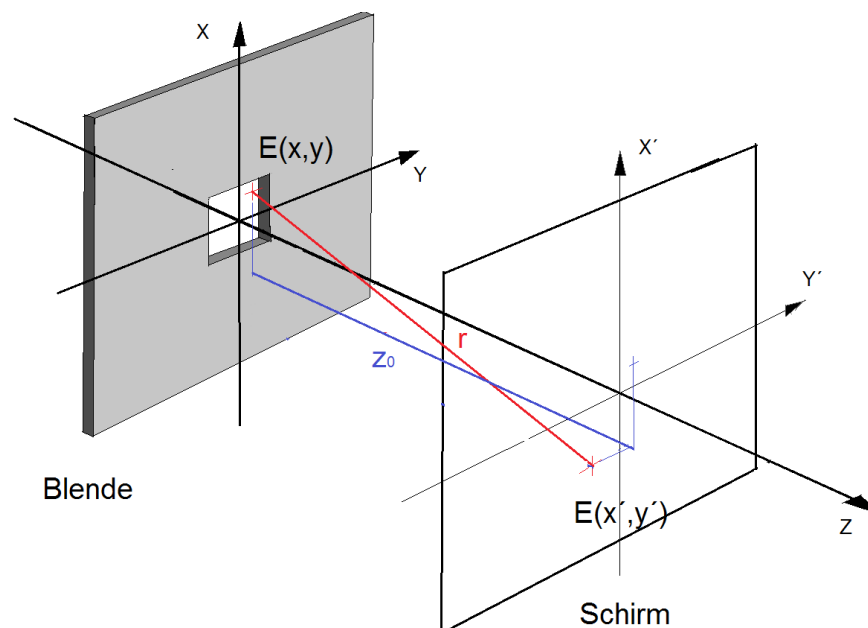


Abbildung 7: Größen im Beugungsintegral

Grundsätzlich hat das Beugungsintegral folgende Form [KIE]:

$$E(x'; y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C \cdot E(x, y) \cdot \frac{e^{ikr}}{r} dx dy, \quad [2.1]$$

wobei C eine Konstante mit der Größe $C = (\lambda i)^{-1}$ ist [DAI], und k der Wellenzahlvektor mit $k = 2\pi/\lambda$. Setzt man, gemäß dem Satz von Pythagoras für

$$r = \sqrt{z_0^2 + (x - x')^2 + (y - y')^2} \quad [2.2]$$

ein, kann eine Taylor-Entwicklung durchgeführt werden:

$$r = z_0 \left(1 + \frac{(x - x')^2}{2z_0^2} + \frac{(y - y')^2}{2z_0^2} + \dots \right). \quad [2.3]$$

Diese Näherung ist allerdings nur für den Exponentialterm in [2.1] nötig, da er die Phaseninformation der elektromagnetischen Welle enthält. Für den Nenner, welcher die Abschwächung der Feldstärke im Abstand r angibt, kann $r \approx z_0$ gesetzt werden. Somit wird [2.1] zu:

$$E(x'; y'; z_0) = \frac{e^{ikz_0}}{i\lambda z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y) \cdot e^{\frac{ik}{2z_0}((x-x')^2 + (y-y')^2)} dx dy \quad [2.4]$$

Dieser Bereich wird auch Fresnel-Näherung genannt. Er berücksichtigt auch die Krümmung der Wellenfronten für kleine z_0 . Für größere z_0 kann die Gleichung zusätzlich vereinfacht werden. Wendet man die binomischen Formeln auf den Exponentialterm an, gilt für den entstehenden Ausdruck:

$$e^{\frac{2\pi(X^2 + Y^2)}{\lambda z_0}} \rightarrow 1 \quad \text{für} \quad z_0 \gg \frac{x^2 + y^2}{\lambda}. \quad [2.5]$$

Der quadratische Ausdruck mit den gestrichenen Koordinaten kann vor das Integral gezogen werden, somit wird gemäß [KIE] [2.4] zu:

$$E(x'; y'; z_0) = \frac{e^{-ik(z_0 - \frac{x'^2 + y'^2}{2z_0})}}{i\lambda z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y) \cdot e^{-\frac{ik}{z_0}(xx' + yy')} dx dy. \quad [2.6]$$

Die auf dem Schirm zu erkennenden Beugungserscheinungen für den in [2.5] definierten Bereich wird Fraunhoferbeugung genannt [DAI] [KIE], diese tritt im Fernfeld auf. Die Beugungserscheinungen im Nahfeld werden Fresnelbeugung genannt.

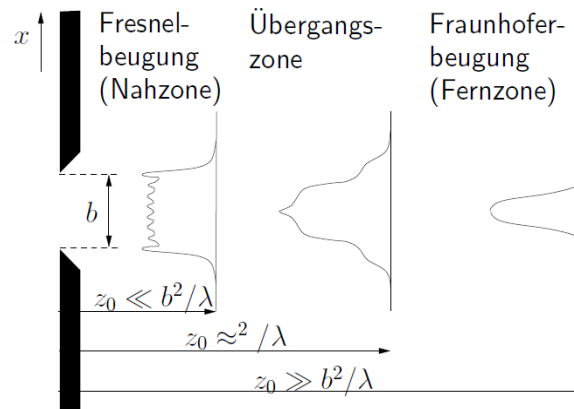


Abbildung 8: Beugungszonen [DAI]

Die Modulation des Beugungsbildes kann auf zwei Arten erfolgen. Beiden Varianten ist jedoch gemein, dass sie Einfluss auf die Ausgangsfunktion $E(x,y)$ in der Blendenebene nehmen. Die erste Möglichkeit ist, die elektrische Feldstärke in der Blendenebene zu modulieren. Dabei wird $E(x,y)$ zu

$$E(x; y) = E_0 \cdot f_b(x, y) \quad , \quad [2.7]$$

wobei E_0 die Ausgangsfeldstärke ist und f_b die Blendenfunktion. Diese stellt eine Funktion des Transmissions- oder Reflexionsgrades der Blende an der Stelle x,y dar und nimmt dementsprechend Werte zwischen 0 und 1 an. Der einfachste Fall ist die Beugung an einer Rechteckblende mit den Abmessungen $a \times b$ (s. Abb. 8). Für diesen nimmt f_b folgende Form an:

$$f_b = 0 \quad \forall -\frac{b}{2} > x > \frac{b}{2} \quad \text{und} \quad f_b = 1 \quad \forall -\frac{b}{2} \leq x \leq \frac{b}{2} \quad [2.8]$$

$$\text{und} \quad f_b = 0 \quad \forall -\frac{a}{2} > y > \frac{a}{2} \quad \text{und} \quad f_b = 1 \quad \forall -\frac{a}{2} \leq y \leq \frac{a}{2} \quad . \quad [2.9]$$

Nach [2.6] ergibt die Lösung des Beugungsintegrals :

$$E(x'; y'; z_0) = -\frac{E_0 z_0 k}{\lambda} \cdot e^{ik(z_0 + \frac{x'^2 + y'^2}{2z_0})} \cdot \frac{b \cdot \text{sinc}(\frac{kb}{2z_0} x')}{2z_0} \cdot \frac{a \cdot \text{sinc}(\frac{ka}{2z_0} y')}{2z_0} \quad [2.10]$$

Das Betragsquadrat dieser Lösungsfunktion gibt die Intensitätsverteilung am Schirm an.

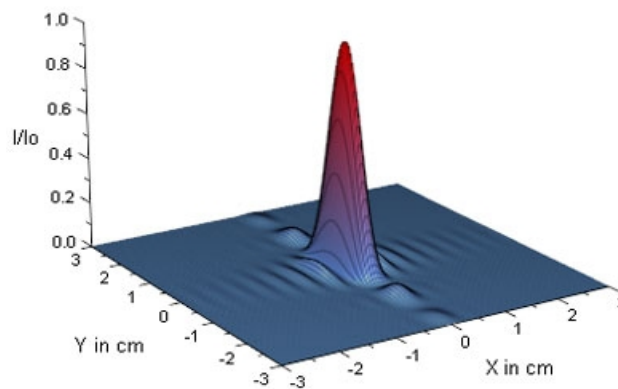


Abbildung 9: Intensität des Beugungsmusters einer Rechteckblende (Quelle : Wikipedia)

Diese Art von DOEs können relativ schnell über die Belichtung und Entwicklung eines Photoresists hergestellt werden, sie werden auch als Amplitudengitter bezeichnet. Ihr Nachteil besteht darin, dass am Gitter selbst Strahlung absorbiert wird, was nicht nur die für die eigentliche Aufgabe zur Verfügung stehende Intensität mindert, sondern auch zur Beschädigung des optischen Gitters führen kann, sollte es zur Formung eines Laserstrahls verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit, Einfluss auf das Beugungsbild zu nehmen, besteht darin, die Phasenlage der EM-Welle in der xy-Ebene der Blende zu modulieren. Für diesen Fall wird $E(x;y)$ zu:

$$E(x; y) = E_0 \cdot f_b(x; y) \quad \text{mit} \quad f_b(x; y) = e^{i\Delta\Phi(x; y)} \quad [2.11]$$

Die Phase einer Welle kann über den optischen Weglängenunterschied in der Blendenebene verändert werden. Für ein DOE als Transmissionsoptik gilt:

$$\Delta \varphi(x; y) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 - n_2) \cdot d(x; y) \quad [2.12]$$

und für eine Reflexionsoptik:

$$\Delta \varphi(x; y) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2d(x; y)}{\cos \epsilon} \quad [2.13]$$

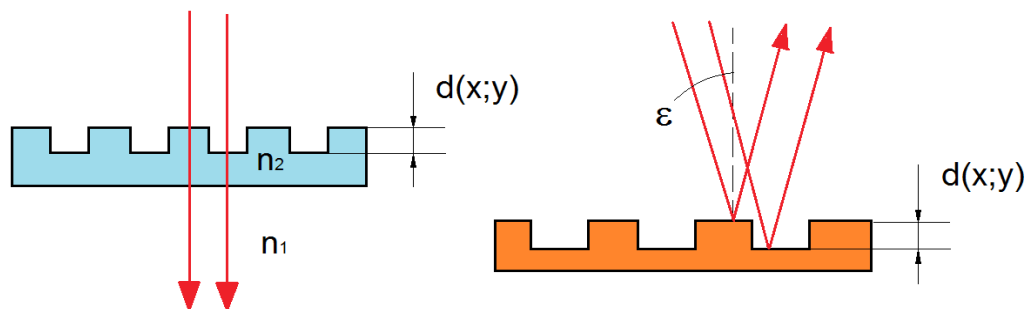


Abbildung 10: Transmissionsgitter (links); Reflexionsgitter (rechts)

Die Herstellung von Phasengittern ist mit höherem Aufwand verbunden als bei Amplitudengittern. In den meisten Fällen werden ein- oder mehrstufige Lithografieverfahren angewendet [STA] [BLI]. Über die aus der Mikrosystemtechnik bekannten Ätzraten kann die gewünschte Strukturtiefe bei guter Oberflächenqualität erreicht werden.

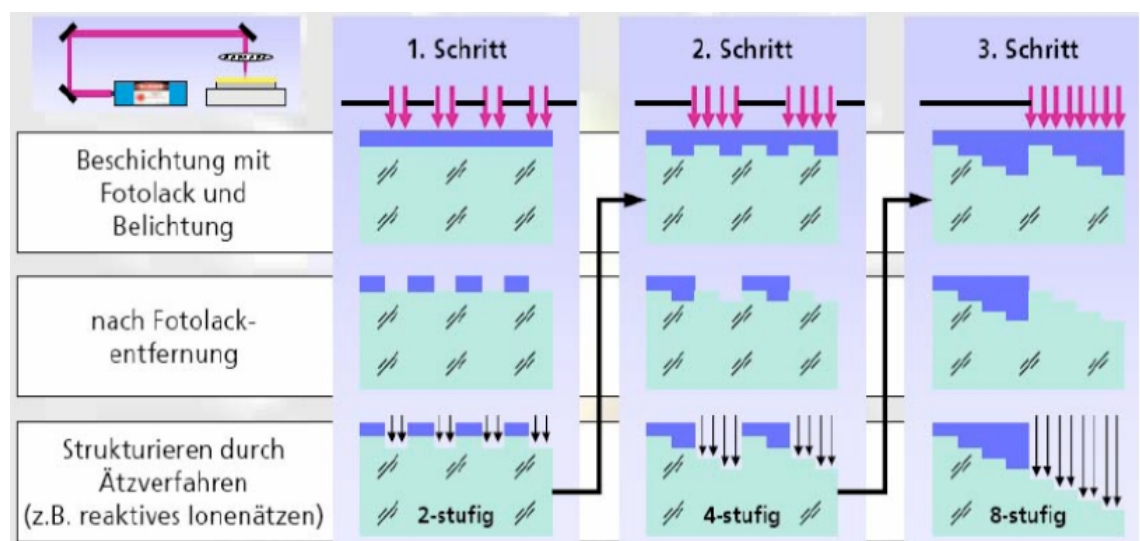


Abbildung 11: Herstellung einer Achtstufigen DOE-Struktur in 3 Lithografieschritten [DAI]

Neben der Lithographie gibt es auch einige Sonderverfahren, die ebenfalls für die Herstellung von DOEs verwendet werden, wie z.B. die mechanische Mikrobearbeitung. Dabei wird die Struktur mit Hilfe einer Diamantspitze direkt in das Substrat übertragen [BLI]. Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Spanbildung die möglichen Oberflächen-formen dahingehend limitiert, dass keine geschlossenen Vertiefungen mit hohen Aspektverhältnis realisiert werden können. Prägen und Ultraschallerosion (s. 1.2.1.) kommen ebenfalls in Frage, allerdings ist man bei der Herstellung des Masters auf die oben genannte Verfahren angewiesen.

Größtenteils noch in der Entwicklung befinden sich Strahlbearbeitungsverfahren für die Herstellung von DOEs. Dabei wird ein lokaler Materialabtrag im Fokus des Strahls erzielt. Wird das Strahlwerkzeug in genau definierten Bahnen über die Substratoberfläche geführt, kann nahezu jede beliebige Oberflächenstruktur erzeugt werden. In diese Gruppe gehört auch das in dieser Arbeit verwendete Verfahren der Lasermikrostrukturierung mittels F_2 -Laserstrahlung. Des weiteren eignen sich aber auch Ionen-, Elektronen-, und Wasserstrahlen für die Strukturierung [BLI].

Bei der Fertigung eines DOEs kann es zu Fehlern kommen, welche die Beugungseffizienz oder das Beugungsmuster beeinflussen. Ein typischer Fehler, welcher bei mehrstufiger Lithografie auftreten kann, ist der Maskenversatz. Dieser erzeugt auf der gesamten DOE-Oberfläche ein zweites, zu der ursprünglichen Struktur leicht versetztes Gitter und verändert somit das Beugungsmuster.

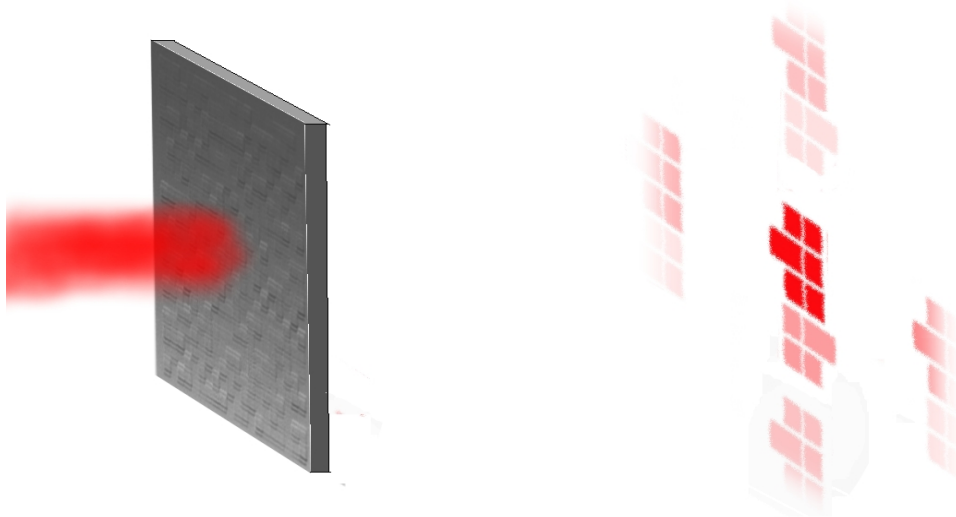


Abbildung 12: Beugungsbild eines Gitters mit Maskenversatz

Höhenfehler oder die für diese Arbeit bedeutendere Kantenverrundung (s. 3.5.) nehmen hingegen Einfluss auf die Beugungseffizienz. Der Einfluss eines fehlerhaften Bereiches hängt auch davon ab, wie groß er im Verhältnis zum gesamten durchstrahlten Bereich ist. Je größer dieses ist, desto größer wird der Anteil der Elementarwellen mit falscher Phaseninformation.

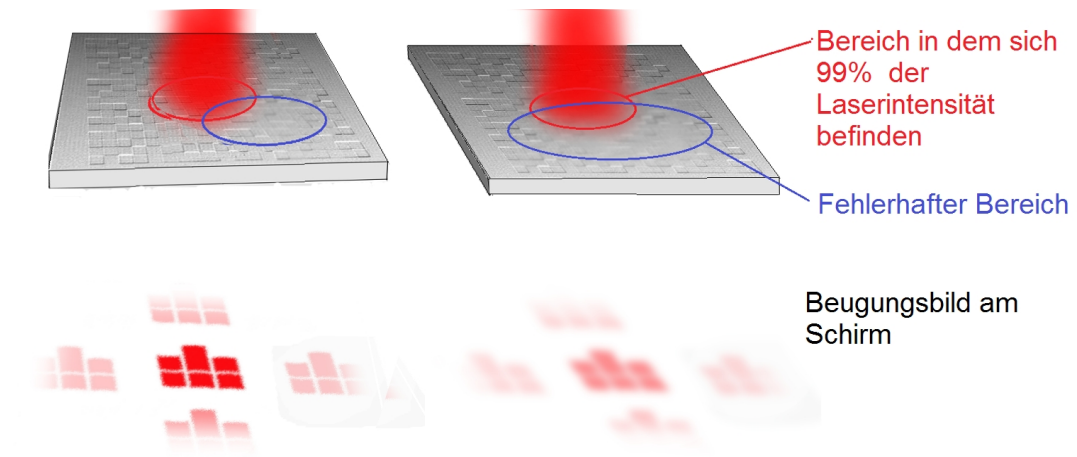


Abbildung 13: Einfluss der Höhenfehler auf das Beugungsbild

2. 2. Thermische Eigenschaften von Quarzglas

Der Werkstoff Glas wird als eine unterkühlte Schmelze charakterisiert. Mit Abnahme der Temperatur erfolgt ab einer Temperatur T_s (Schmelztemperatur für einen Quarzkristall) nicht der Übergang in den kristallinen Zustand, sondern die Schmelze unterkühlt. Im Übergangsbereich stellen sich metastabile Zustände ein, in denen Schmelze und der sprödharte Zustand koexistieren. Ab einer Temperatur T_g (Transformationstemperatur) erstarrt die Schmelze und geht in den sogenannten Glaszustand (amorpher Zustand) über.

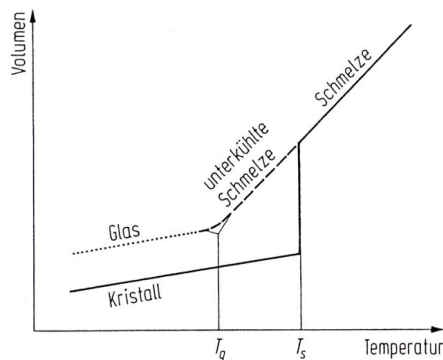


Abbildung 14: Temperaturabhängigkeit des Volumens bei Glas [BRO]

Nahezu alle thermischen und mechanischen Eigenschaften von Gläsern hängen von dessen Temperatur ab. Dies gilt auch für die Viskosität, welche ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Stoffes ist. Je größer die Viskosität desto dickflüssiger ist das Fluid. Der Verlauf der dynamischen Viskosität bei Gläsern besitzt eine charakteristische Form, welche stark von Zusätzen und Verunreinigungen beeinflusst wird. Sie umfasst mehrere Größenordnungen

und wird deshalb logarithmisch dargestellt. Je nach Viskosität (bzw. Temperatur) sind unterschiedliche Verarbeitungsvarianten für Gläser möglich.

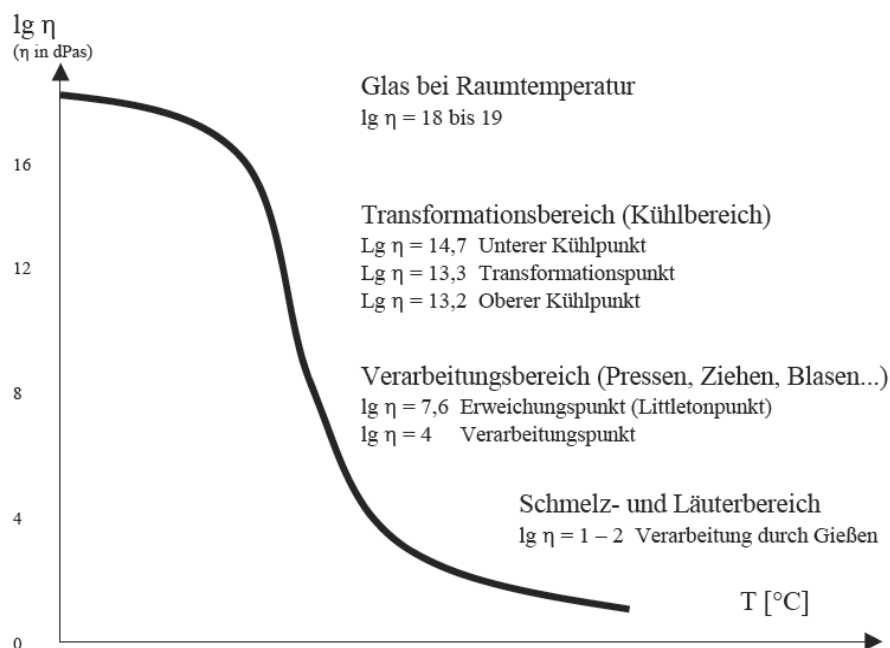


Abbildung 15: Viskosität von Glas in Abhängigkeit der Temperatur [BRO]

Da Quarzglas aus reinem Siliziumdioxid besteht (der Grad der Verunreinigung liegt im ppm oder ppb-Bereich), besitzt es eine höhere thermische, chemische und mechanische Beständigkeit als andere Gläser auf Siliziumbasis. Um die in Abb. 15 genannten Viskositäten zu erreichen, muss Quarzglas auf folgende Temperaturen gebracht werden [MAC]:

Transformationsbereich:

- Unterer Kühlpunkt: 1120 °C
- Oberer Kühlpunkt: 1215 °C

Verarbeitungsbereich:

- Erweichungspunkt: zwischen 1500 und 1680 °C
- Verarbeitungspunkt: $T > 2000$ °C

Der Siedepunkt von Quarzglas wird auf eine Temperatur von etwa 2230 °C geschätzt, wobei der Wert schwanken kann, da er stark von der Konzentration der Verunreinigungen abhängt. Um einen maximalen Glättungserfolg beim thermischen Glätten zu erreichen, muss die Viskosität des Glases so weit wie möglich herab gesetzt werden. Daraus folgt die Forderung, die Temperatur so nah wie möglich an den Siedepunkt heran zu bringen, ohne ein Sieden hervorzurufen.

2. 3. Thermisches Glätten mittels Laser

Bei thermischen Glättungsverfahren wird die Oberfläche des zu glättenden Objekts über den Schmelzpunkt hinaus erwärmt. Die entstehende dünne Flüssigkeitsschicht läuft aufgrund der ihr eigenen Oberflächenspannung breit und glättet somit Unebenheiten. Laserglättung und -Politur hat das Potential, konventionelle Verfahren abzulösen aufgrund der höheren Prozessgeschwindigkeit und Flexibilität durch CNC-programmierbare Bewegungsabläufe (vgl. [ILT 1], [POW], [JEN]).

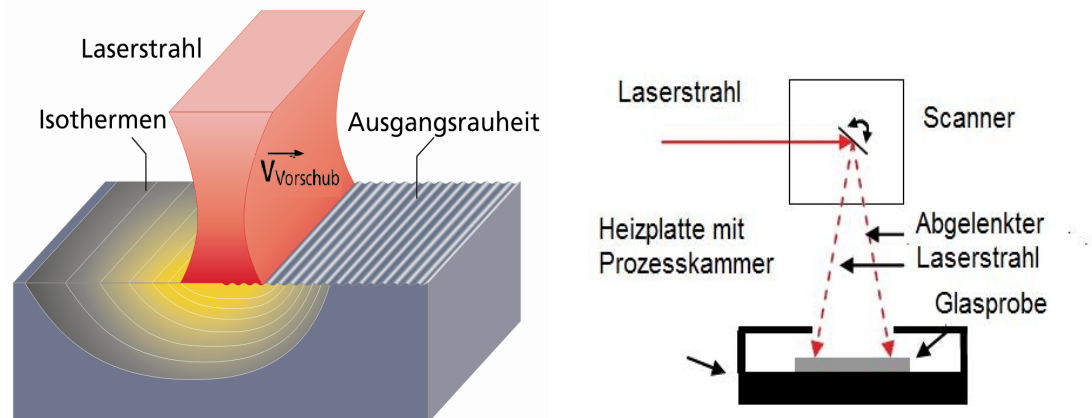


Abbildung 16: Prinzip der thermischen Glättung [ILT 1]

Der prinzipielle Aufbau für thermisches Laserglätten ist, unabhängig von den gewählten Prozessparametern, immer ähnlich (Abb. 16). Ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge, welche für das Material einen hohen Absorptionskoeffizienten besitzt, wird mittels eines Scannersystems auf die Substratoberfläche abgelenkt. Dies gewährleistet höchst mögliche Prozessgeschwindigkeiten. Da es sich bei dem Substrat um Gläser handelt, befindet sich dieses dabei auf einer Heizplatte, um thermische Spannungen zu reduzieren. Alternativ zum Scannersystem kann auch ein x-y-Koordinatentisch verwendet werden. Zusätzlich ist die Verwendung einer Prozesskammer möglich, um Staubeinschlüsse zu vermeiden.

Um die Oberflächenrauheit zu beurteilen, kann eine Oberfläche selbst als Menge von Messpunkten, welche um einen Mittelwert schwanken, angesehen werden. Die Oberflächenrauheit R_a ist die mittlere Abweichung der Messwerte vom Mittelwert $\langle z \rangle$:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N (z_n - \langle z \rangle) \quad [3.1]$$

Die x-z-Wertepaare sind Teil einer kontinuierlichen Funktion $z(x)$ [HIE]. Für diese wird der Summenausdruck in [3.1] zu einem Integral:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l (z(x) - \langle z \rangle) dx \quad [3.2]$$

Im Folgenden soll l als die Messlänge bezeichnet werden. An der Funktion $z(x)$ kann eine Fourier-Transformation durchgeführt werden, somit wird das Oberflächenprofil als eine Überlagerung von Wellen (im Folgenden als Oberflächenwellen bezeichnet) eines kontinuierlichen Spektrums beschrieben. Das Profil einer rauen Oberfläche besitzt große Ähnlichkeit mit einem Rauschsignal:

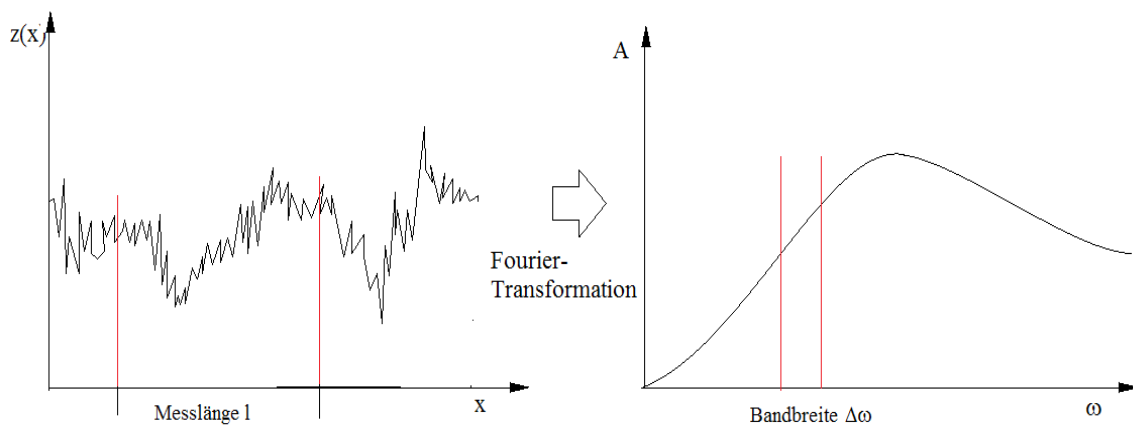


Abbildung 17: Fourier-Transformation des Oberflächenprofils

Dadurch kann zur exakten Beurteilung der Glättung die Oberflächenrauheit für verschiedene Wellenlängen einer gewissen Bandbreite (s. Abb. 17) angegeben werden. Die bisherige Forschung hat gezeigt, dass der Glättungserfolg umso größer ist, je größer die Laserleistung ist. Gleichzeitig sollte die Interaktionszeit des Strahls mit der Oberfläche möglichst lang sein [ILT 2]. Diese berechnet sich folgendermaßen:

$$t_{\text{int}} = \frac{w_{\text{Laser}}}{v_{fl}} \quad [4]$$

wobei v_{fl} die Geschwindigkeit mit der die mit dem Scanner erzeugte Linie über die Fläche gefahren wird und w_{Laser} der Strahlradius ist. Für die Analyse der mittleren Oberflächenrauheiten bei verschiedenen Oberflächenwellenlängen kann die computer-gestützte Weißlicht-interferometrie herangezogen werden.

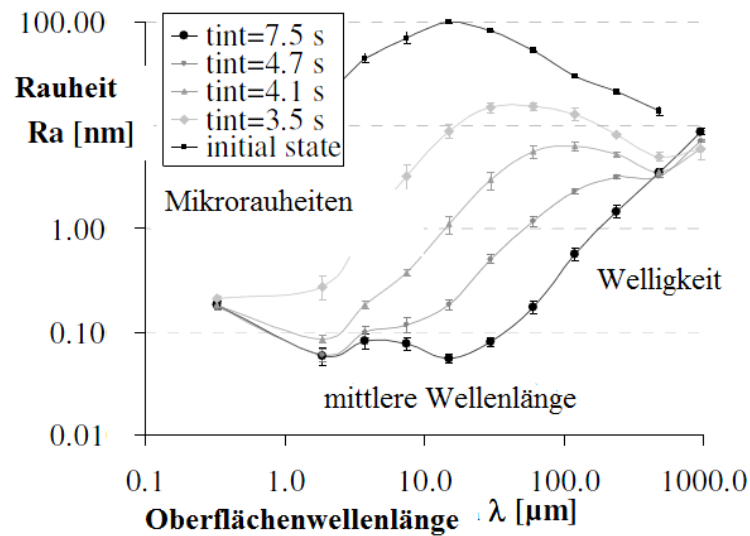


Abbildung 18: Rauheiten R_a bei verschiedenen Oberflächenwellenlängen und t_{int} [ILT 2]

Aus Abb. 18 wird ersichtlich, dass Mikrorauheiten und mittlere Wellenlängen sehr gut geglättet werden können. Für höhere Wellenlängen nähert sich die mittlere Rauheit der Ausgangsrauheit an. Eine zusätzliche Glättung kann dadurch erzielt werden, dass die Interaktionszeit erhöht wird. Dies liegt daran, dass durch die längere Einwirkung des Laserstrahls auf die Oberfläche eine höhere Temperatur erreicht wird und dadurch die Viskosität des Glases gesenkt und der aufgeschmolzene Bereich vergrößert wird. Eine Verdampfung von Material sollte vermieden werden, da dadurch eine zusätzliche Welligkeit in die Oberfläche eingebracht wird.



Abbildung 19: Lasergeglättete Linse im Vorher-Nachhervergleich [ILT 3]

3. Material und Methoden

3.1. F₂-Laser LPF 220i

Ziel der Arbeit ist es, ein mittels F₂-Lasermikrostrukturierung hergestelltes diffraktives optisches Element zu glätten. Um das Original nicht der Gefahr einer Beschädigung auszusetzen und die Wirkung der Laserglättung auf die Oberflächenstruktur so genau wie möglich zu untersuchen, wird eine Reihe von Test-DOEs erstellt. Die dazu verwendete Anlage und deren Strahlengang sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

Es sind folgende Daten des Lasers bekannt:

Laserart	Excimer-Laser
Resonatorgas	Neon-Helium-Fluor Gasgemisch
Anregung der Moleküle	über Gasentladung
Pumpquelle	Elektrische Entladung; bis 26 kV
Wellenlänge	157 nm
Photonenenergie	7,9 eV
Pulsfrequenz	1 bis 200 Hz
Pulsbreite (FWHM)	25 ns
höchste Pulsenergie	30 mJ
höchste Laserleistung	6000 mW



Abbildung 20: Laser LPF 200i
Strahlquelle [BER]

Tabelle 1: Daten des F₂-Lasers LPF 220i [LPF]

F₂-Laser emittieren Strahlung einer Wellenlänge von 157 nm, welche sehr stark von Sauerstoff absorbiert wird. Deshalb befindet sich der gesamte Strahlengang und die separate Bearbeitungskammer während einer Bearbeitung in einer Atmosphäre aus hochreinem Stickstoff (Reinheit: 99,9990%) [BER]. Bevor Strahlengang, Objektiv und Bearbeitungskammer mit Stickstoff geflutet werden, werden diese mit einer Torbomolekularpumpe auf einen Druck von $p < 5 \times 10^{-5}$ mBar evakuiert. Als Vorpumpe dient eine Scrollpumpe. Die Bearbeitungskammer, in welcher sich das Substrat befindet, kann separat mit einer Scrollpumpe auf einen Druck von $p < 0,1$ mBar evakuiert werden. Der Rohstrahl weist beim Verlassen des Resonators ein Rechteckprofil von 23 mm (in x-Richtung) x 7 mm (in y-Richtung) und eine Divergenz von 3 mrad x 1 mrad auf [HÄN].

Um den Rohstrahl an die Bearbeitungsaufgabe anzupassen, wurden folgende Komponenten im Strahlengang installiert:

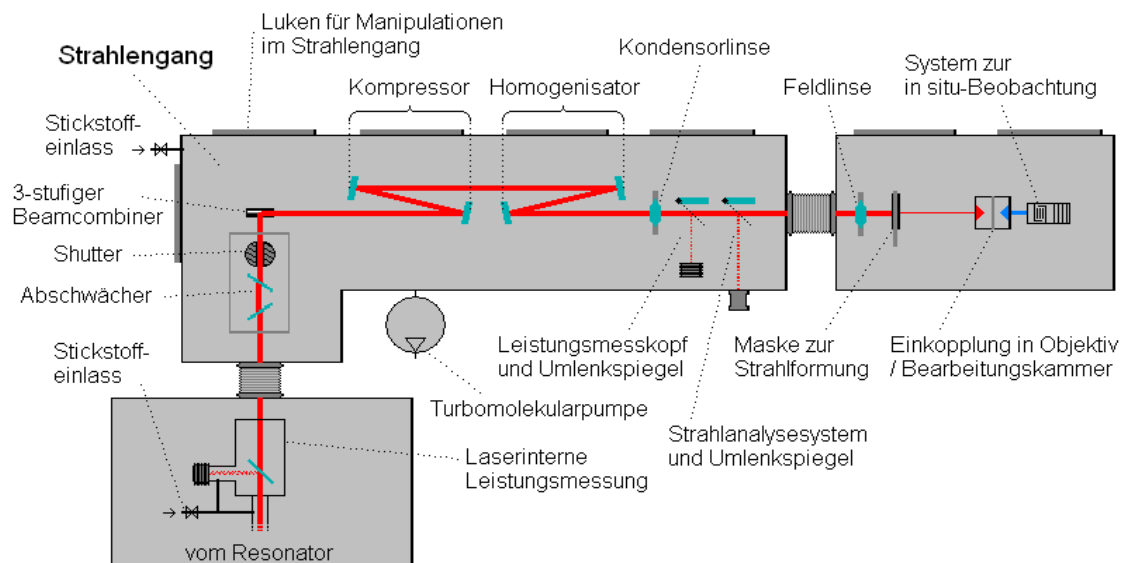


Abbildung 21: Strahlengang des F_2 -Lasers [BER]

- Abschwächer** Der Abschwächer besteht aus zwei planparallelen Kalziumfluoridplatten. Der Reflexionsrad für dieses Material ist für die Wellenlänge des F_2 -Lasers stark vom Einfallswinkel abhängig. Über eine Verkipfung der Platten um den selben Winkel gegeneinander kann die Strahlenergie im Weiteren Strahlengang reguliert werden. Die zweite Platte kompensiert den Strahlversatz, welche an der ersten auftritt.
- Beamcombiner** Der Beamcombiner besteht aus zwei dreistufigen Spiegelsegmenten. Der Strahl wird beim Durchgang durch diese in drei Teilstrahlen zerlegt, welche jeweils um 90° gedreht wieder zusammengesetzt werden.
- Kompressor** Der Kompressor besteht aus zwei Hohlspiegeln welche den Strahl zu einem quadratischem Profil von 14×14 mm und einer Divergenz von 1×1 mrad stauchen.
- Homogenisator** Der Homogenisator besteht aus zwei Mikrospiegelarrays mit je 196 Segmenten, welche den Strahl aufteilen und so überlagern, dass 800 mm hinter der Anordnung ein Strahl mit homogener Intensitätsverteilung entsteht.

Kondensor und Feldlinse	Diese erzeugen einen Homogen ausgeleuchteten Fleck von 6 x 6 mm.
Maske	Es handelt sich hierbei um eine Projektionsmaske. Diese befindet sich im homogen ausgeleuchteten Fleck um einen gleichmäßigen Abtrag in der Bearbeitungsebene zu gewährleisten. Die maximale Maskengröße wird durch die Größe des homogen ausgeleuchteten Flecks begrenzt. Die Maske selbst besteht aus einer Tantalfolie, aus welcher die abzubildende Geometrie herausgeschnitten wurde.
Objektiv	Das Objektiv ist eine aus fünf Linsen bestehende Kalziumfluoridoptik. Der durch die Projektionsmaske in der Querschnittsgeometrie geformte Laserstrahl wird durch diese 26,7-fach verkleinert abgebildet. Die Linsenzwischenräume sind ebenfalls mit hochreinem Stickstoff gefüllt. Diese können bei Bedarf auch gespült werden. Um das Objektiv nicht der Gefahr einer Beschädigung auszusetzen wurden hinter der letzten Linse vor dem Substrat Schutzgasdüsen (Crossjet) installiert, welcher per kontinuierlicher Stickstoff-spülung (Reinheit: 99,9990%) während der Bearbeitung ablatierte Partikel davonspült.

Tabelle 2: Komponenten des Strahlenganges [BER]

Die Oberfläche des zu bearbeitende Substrats befindet sich in der Abbildungsebene des Objektives. Um eine Bewegung zwischen Abbildung und Substrat zu realisieren, befindet sich dieses auf einem Koordiantentisch, der per CNC-Steuerung in x,y und z-Richtung bewegt werden kann. Dieses Positioniersystem muss sowohl vakuumtauglich, als auch hochpräziese sein.

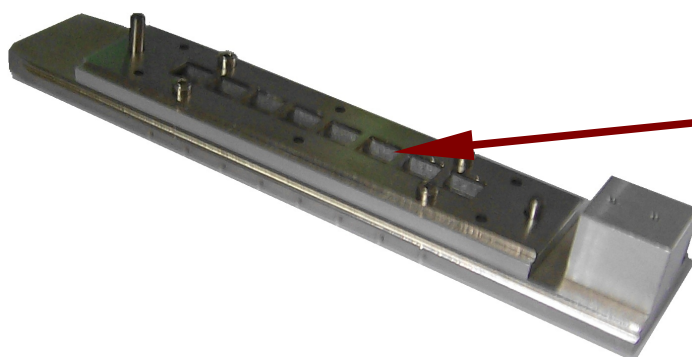


Abbildung 23: Maskenrahmenhalter

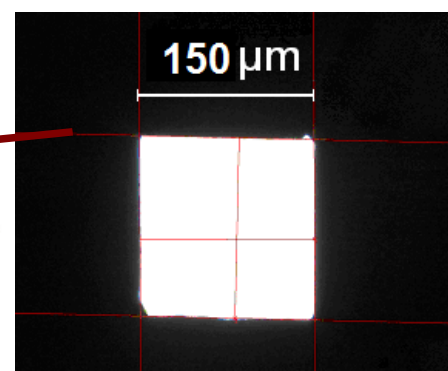


Abbildung 22: Maske [BER]

3. 2. CO₂-Laser FEHA SM600P

3.2.1. Funktionsweise und Eigenschaften der Strahlquelle



Abbildung 24: Laser FEHA SM600P, Strahlquelle

CO₂-Laser eignen sich gut für thermische Glättung von Quarzlas, da dieses einen sehr hohen Absorptionskoeffizient für deren typische Wellenlänge von 10,6 μm hat .

Bei diesem Laser handelt es sich um einen axial angeregten längsgeströmten Niederdruck-gasentladungslaser [FEH].

Folgende Daten des Lasers sind bekannt [FEH]:

Maximale Strahlungsleistung:	600 W
Stabilität der Strahlungsleistung:	$\pm 2 \%$
Maximale Pulsfrequenz:	1 kHz
Pulsbreite:	200 μs bis cw
Resonatorlänge:	10,8 m fünffach gefaltet
Anschlussleistung:	10 kW
Referenzspannung:	0,8 bis 10 V
Strahldurchmesser:	12 mm

Tabelle 3: Daten des CO₂-Lasers FEHA SM600P [FEH]

Die Strahlleistung kann über die Referenzspannung reguliert werden. Zusätzlich ist für diesen Laser ein cw- oder Pulsbetrieb möglich. Für die Glättungsversuche soll der cw-Betrieb verwendet werden, um ein möglichst homogenes Temperaturfeld zu erzeugen.

Der vom Laser emittierte Rohstrahl besitzt ein TEM₀₀-Profil und wird über Umlenkspiegel zum Bearbeitungsort geführt. Um eine für die thermische Glättung ausreichen hohe Fluenz zu generieren, wird er mit Hilfe einer vor dem Scannersystem (s. 3.2.2.) angeordneten aktiv wassergekühlten sphärischen ZnSe-Linse fokussiert. Der Strahl besitzt damit einen Strahldurchmesser von 1 bis 2 mm auf dem Substrat. Dieser wurde bewusst so groß gewählt, um ein gleichmäßiges Bearbeitungsergebnis bei kurzer Prozesszeit zu gewährleisten.

3. 2. 2. Versuchsaufbau für den Laser FEHA SM600P

Für eine optimale Glättung, wurde folgender Versuchsaufbau realisiert:

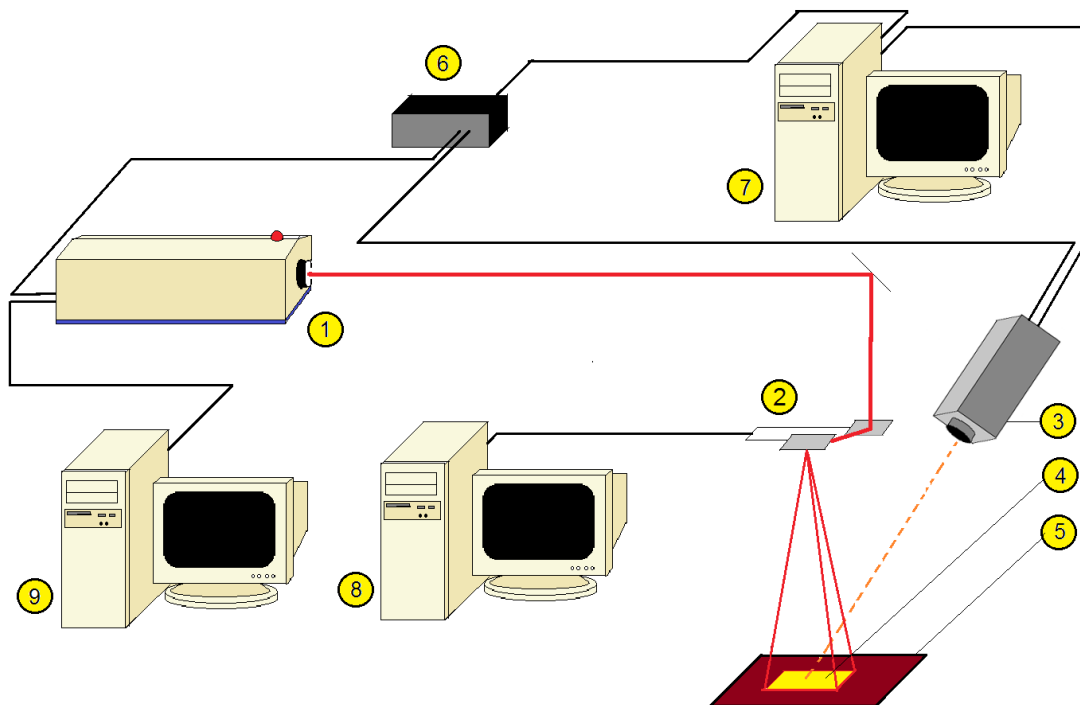


Abbildung 25: Versuchsaufbau für FEHA SM600P

Bestehend aus folgenden Komponenten:

1	Strahlquelle	- erzeugt parallelisierten Laserstrahl
2	Scanner	- Ablenkung des Laserstrahls in mäanderförmigen Bahnen zur Erzeugung eines homogenen Temperaturfeldes
3	Pyrometer	- nimmt Temperaturwerte der Substratoberfläche in der Mitte des abgerasterten Feldes auf
4	Scanfeld	- an dieser Stelle kann die zu glättende Probe positioniert werden
5	Heizplatte	- Heizt Substrat bis auf eine Temperatur von bis zu 500 °C und verhindert so Thermospannungen
6	Blackbox	- Wandelt Computerdaten und Pyrometerdaten in eine analoge Ansteuerspannung von 0 bis 10 V für den Laser
7	Temperaturmonitor	- Aufzeichnung der Temperaturkurve - Generierung von Temperatur – Zeit – Kurven für die Bearbeitung und Kommunikation mit der Blackbox
8	Computer 1	- Ansteuerung des Scanners
9	Computer 2	- Hauptcomputer des Lasersystems

Tabelle 4: Komponenten im Versuchsaufbau für FEHA SM600P

Beim Versuchsaufbau ist darauf zu achten, dass das Glassubstrat nicht die Heizplatte berührt. Der vom Laser behandelte Bereich des Substrates sollte in einem kurzen Abstand über der Heizfläche angeordnet werden. Außerdem sollte, um zu große thermische Belastungen an den Umkehrpunkten des Verfahrensweges zu vermeiden, ein Strahlabsorber mit einer Öffnung für den zu behandelnden Bereich eingesetzt werden. Dieser sollte das Substrat ebenfalls nicht berühren.

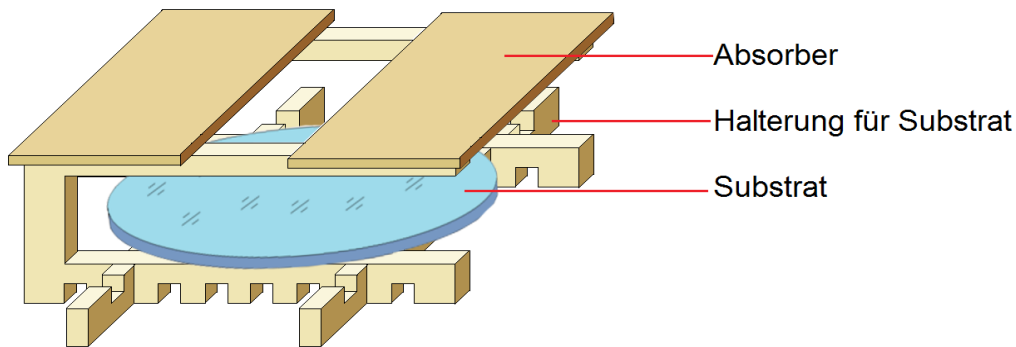


Abbildung 26: Designvorschlag für Substrathalter

Ein alternativer Aufbau sieht die Verwendung von zwei ZnSe-Linsen vor, um einen Linienfokus zu erzeugen. Bei diesem Aufbau wird auf ein Scannersystem verzichtet. Die Relativbewegung zwischen Strahl und Substrat kann hier mit einem x-y-Koordinatentisch realisiert werden. Das Pyrometer misst mit kleinstmöglichem Messfeld die Temperatur in der Mitte des Linienfokus. Bei dieser Variante ist es starr im Verhältnis zum Strahl. Wenn die Optik aus einer Sammellinse und einer Zylinderlinse besteht, kann die Linienbreite und der Abstand des Substrates zur Linse auf folgende Weise berechnet werden:

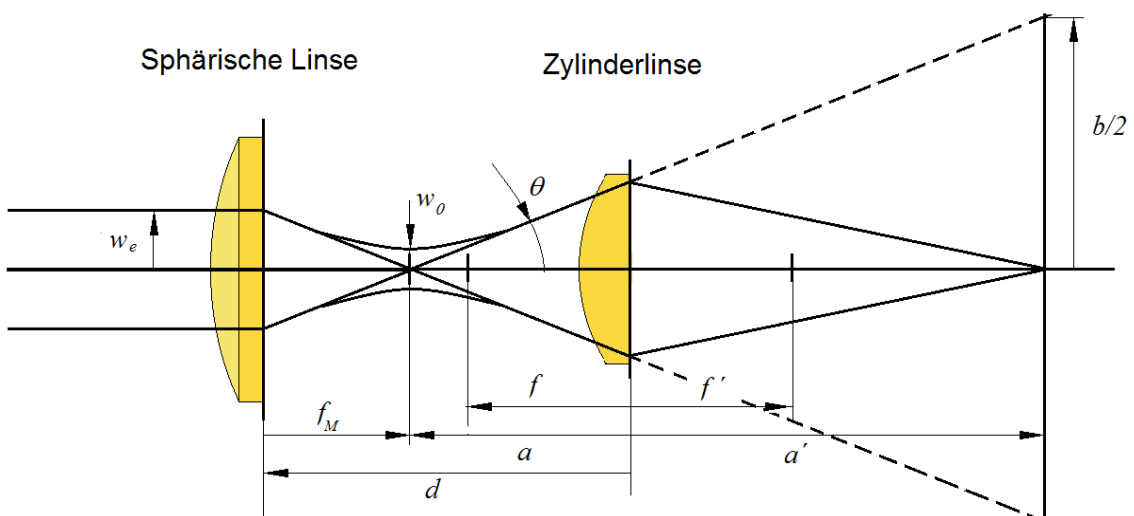


Abbildung 27: Abbildung eines Gaußstrahls

Im Fokus der sphärischen Linse besitzt der Strahl einen Durchmesser von:

$$\tan \theta = \frac{w_e}{f_M} = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} , \quad [5.1]$$

damit gilt für w_0 :

$$w_0 = \frac{f_M \cdot \lambda}{w_e \cdot \pi} . \quad [5.2]$$

Laut [EIC] gilt für die Raylightlänge z_R :

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} , \quad [5.3]$$

und für die Größe a' :

$$a' = -f + \frac{f^2 \cdot (f - a)}{(f - a)^2 + z_R^2} \quad [5.4]$$

Setzt man [5.2] [5.3] und [5.4] ineinander ein, erhält man die Gleichungen

$$a'(a) = -f + \frac{f^2 \cdot (f - a)}{(f - a)^2 + \frac{f_M^4 \lambda^2}{w_e^4 \pi^2}} \quad [5.5]$$

Für die Berechnung der Breite b der Linie können die Strahlensätze herangezogen werden. Damit kommt man auf folgende Gleichung:

$$b(a) = \frac{w_e \cdot 2(a' - a)}{f_M} \quad [5.6]$$

Mit der Beziehung $d = a - f_M$ kann das optische System vollständig berechnet werden. Die Linienbreite b ist in weiten Grenzen wählbar, wird aber durch den Durchmesser der Zylinderlinse nach oben begrenzt. Fordert man, dass der Strahlradius in der Ebene der dieser den Anteil $\epsilon < 1$ von deren Durchmesser d_L überdeckt, berechnet sich die maximale Breite b zu:

$$b_{max} = d_L \epsilon \cdot \frac{a' - a}{a} \quad [5.7]$$

$$\frac{2 w_e}{f_M} = - \frac{d_L \epsilon}{a} \quad [5.8]$$

Bei den Gleichungen [5.7] und [5.8] kann auf die Einbeziehung der Strahlkaustik verzichtet werden, da der Linsendurchmesser der Zylinderlinse viel breiter ist als w_0 und die Linse damit weit außerhalb der Kaustik positioniert werden kann.

3. 3. CO₂-Laser Synrad 57-2

Der zweite Laser, der für eine thermische Glättung verwendet wurde, ist ein CO₂-Laser mit einer maximalen Strahlleistung von 210 W*. Zusätzlich sind folgende weitere Daten des Lasers bekannt [SYN]:

Anschlussleistung, elektrisch*	2000 W
Pulsfolgefrequenz*	5 kHz
Brennweite der Scanneroptik*	200 mm
Strahlprofil*	TEM ₀₀
Strahlparameterprodukt**	1,4
Divergenz nach der Strahlquelle*	5 mR
Divergenz nach der Scanneroptik**	2 °
Strahldurchmesser auf dem Substrat**	140 µm
max. Leistung am Bearbeitungsort**	145,5 W
Leistungsstabilität*	± 5 %

Tabelle 5: Daten des CO₂-Lasers Synrad 57-2

Folgender Versuchsaufbau wurde realisiert:

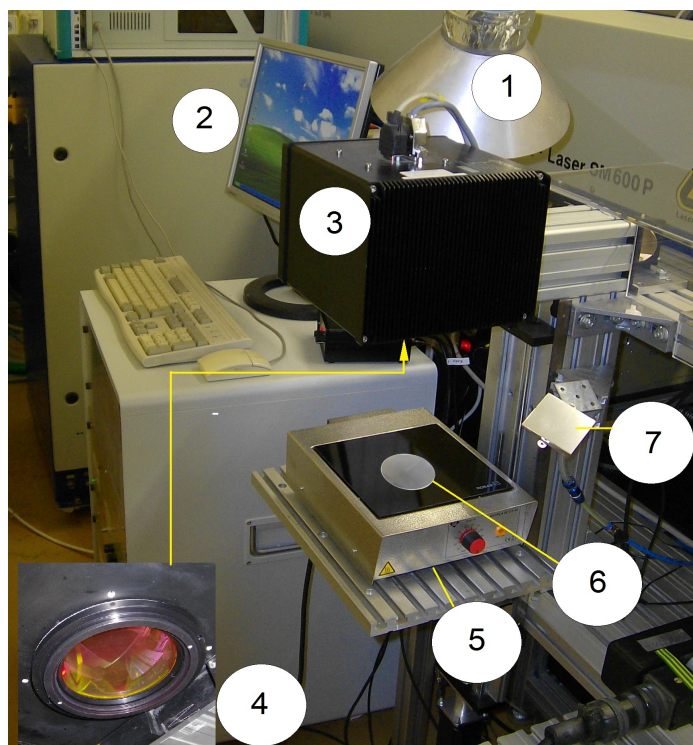


Abbildung 28: Versuchsaufbau für Synrad 57-2

1: Abzug

2: Ansteuerung des Lasersystems mit der Beschriftungssoftware „SamLight“

3: Scannermodul

4: F-Teta-Optik

5: Heizplatte

6: Substrat

7: Kühlung der Optik mittels Druckluft

* Herstellerangabe; ** Vermessen mit „FokusMonitor“

Die Ansteuerungssoftware SamLight ermöglicht den Betrieb des Lasers unterhalb seiner Maximalleistung. Der Faktor $f_l < 1$ der Maximalleistung kann im Bereich von 0 bis 100% eingestellt werden. Dieser Aufbau gewährleistet beliebig große Felder mit verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten und Puls-zu-Pulsdistanzen abzurastern. Im Zuge der Strahlvermessung mit dem FocusMonitor wurde ebenfalls die Leistung vermessen. Dabei wurde festgestellt, dass bei einer Ansteuerung mit $f_l < 1$ der theoretische Wert nicht mit dem realen übereinstimmt. Die Übertragungskurve hat folgende Form:

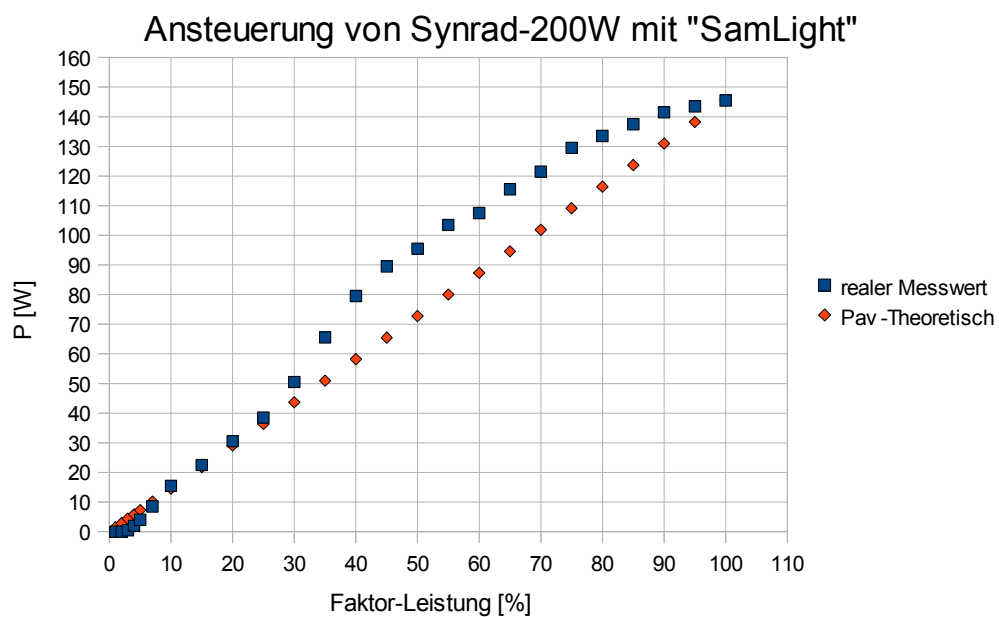


Abbildung 29: Leistung von Synrad 57-2 bei verschiedenen Aussteuerungen (Anl. 1)

3. 4. Die Teststrukturen

Als Substrat dient eine runde Quarzglasscheibe mit einem Durchmesser von 55 mm und einer Dicke von 1,45 mm, vom Typ Corning 7980. An einer solchen Scheibe werden alle Mikrostrukturierungen und Glättungsversuche durchgeführt.

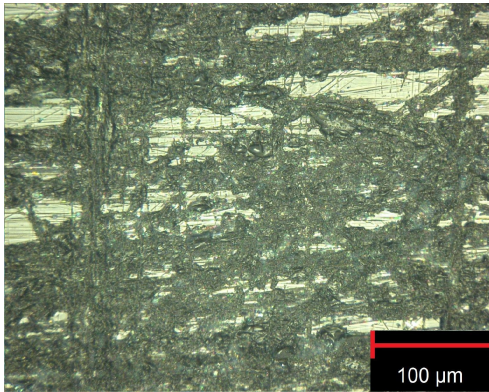


Abbildung 30: Mit Schleifpapier aufgeraute Quarzglasoberfläche

Die einfachste Struktur, die zur Quantifizierung einer möglichen Glättung herangezogen werden kann, ist eine mit Schleifpapier aufgeraute Oberfläche. Der Vorteil besteht darin, dass sehr schnell große Testflächen für umfangreichere Versuchsreihen hergestellt werden können. Die Herstellung großer mikrostrukturierter Bereiche ist im Vergleich dazu sehr zeitaufwendig. Die aus den Versuchsreihen an aufgerautem Quarzglas hervorgehenden optimalen Glättungsparameter sollen an

mittels Fluor-Laser hergestellten Testflächen (Test-DOEs) angewendet werden. Neben der Einschätzung der Glättung soll die Form und Größe eines Test-DOEs dahingehend entworfen werden, dass folgende Effekte untersucht werden können:

- (1) Einfluss der Glättung auf die Kanten geometrie (im Folgenden als Kantenverrundung bezeichnet)
- (2) Einfluss von Kanten auf das Glättungsergebnis, insbesondere Homogenität der Glättung
- (3) Einfluss der Glättung auf die optische Antwort eines DOEs

Alle Testflächen müssen groß genug sein, um daran Profilometermessungen von bis zu 1 mm Länge an mehreren Stellen durchführen zu können. Zusätzlich sollte jede Fläche eines Test-DOEs zu Dokumentationszwecken von einem Laserpointer durchstrahlt werden können.

Die Herstellung einer Test-DOE-Fläche erfolgt durch zeilenförmiges Abrastern der Substratoberfläche mit Fluorlaserpuls. Dabei trägt ein Laserpuls eine genau definierte Menge an Material ab. Die Abtragsraten wurden am Laserinstitut bereits für verschiedene Materialien, unter anderem Quarzglas, von Herrn Bertram im Zuge der Diplomarbeit „Fluorlaser-Mikrobearbeitung von ausgewählten Materialien“ [BER] eingehend untersucht.

Es wurden folgende Abtragsraten für Quarzglas festgestellt:

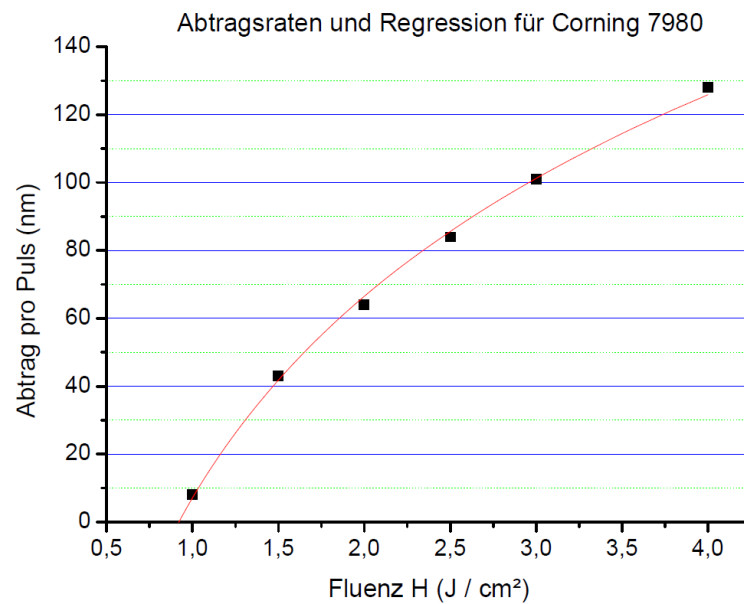


Abbildung 31: Abtragsraten für Corning 7980 [BER]

Ausgehend von diesen Kenntnissen und den Forderungen (1) bis (3) wurden folgende Test-DOEs hergestellt:

Test-DOE 1

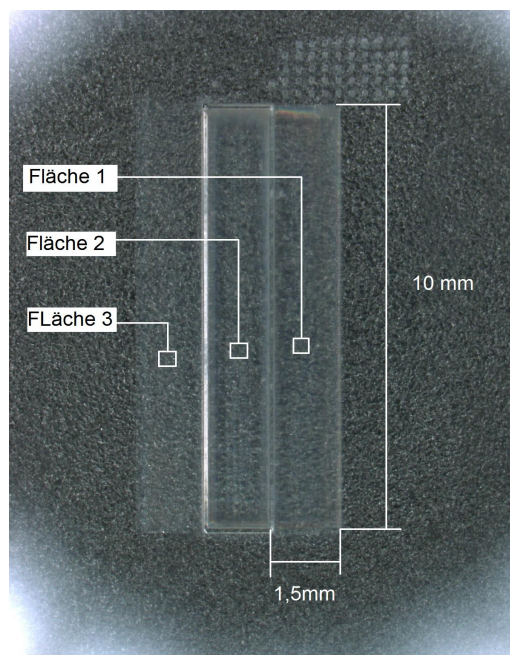


Abbildung 32: Test-DOE 1

Herstellung:

Maske: Quadratisch; 100 μm Kantenlänge
in der Abbildungsebene auf dem
Substrat

Laser: 100 Hz Pulsfrequenz

2 J/cm² Fluenz

90 % Pulsüberlapp (ÜLP)

Fläche 1: 2 Überfahrten (ÜF)

Fläche 2: 16 ÜF

Fläche 3: 1 ÜF

Diese Testfelder wurden angelegt, um gemäß (1) und (2) zu testen, da die größtmögliche Höhenstufe zwischen den Flächen vorhanden ist. Zusätzlich ist das Test-DOE groß genug, um mehr als einen Glättungsversuch daran durchzuführen.

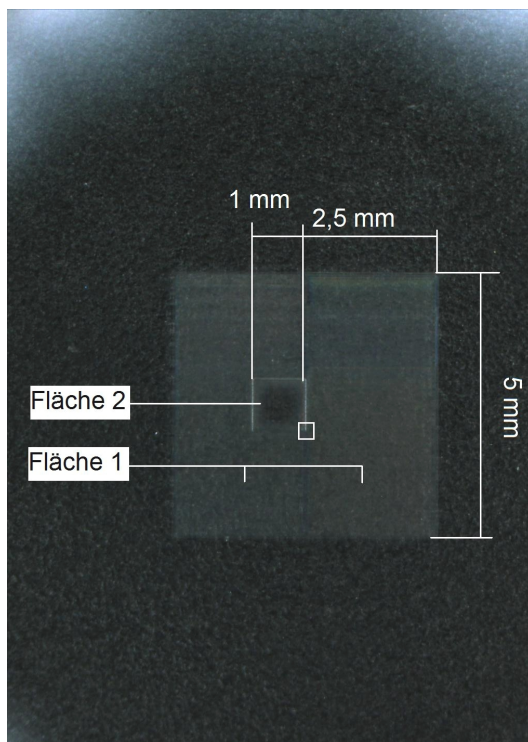
Test-DOE 2

Abbildung 33: Test-DOE 2

Herstellung:

Maske: Quadratisch; 50 μm Kantenlänge in der Abbildungsebene auf dem Substrat

Laser: 120 Hz Pulsfrequenz

2 J/cm^2 Fluenz

90% ÜLP

Fläche 1: 1 ÜF

Fläche 2: 4 ÜF

Dieses Test-DOE wurde angelegt, speziell um gemäß (1) und (3) zu testen. Ein weiterer Vorteil dieser Struktur ist, dass deren Herstellung in kurzer Zeit möglich ist.

Auf den Flächen dieser Test-DOEs zeigt sich ein für diese Strukturierungsvariante typisches Muster. Am Rand der Abtragszone eines Pulses entsteht ein Aufwurf von Material. Durch den gleichbleibenden Abstand der Pulse zueinander auf dem Substrat während der Bearbeitung entsteht eine gleichmäßige Anordnung von Erhebungen. Je kleiner die Maske und/oder je größer der ÜLP ist, desto enger rücken diese zusammen. Sie tragen maßgeblich zur Erhöhung der mittleren Oberflächenrauheit und somit zur Reduzierung der optischen Qualitäten des DOEs bei. Der Abstand p_{sub} der Erhebungen zueinander ist bei einer quadratischen Maske:

$$p_{\text{sub}} = a_{\text{maske}} \cdot (1 - \ddot{U}LP) \quad [6.1]$$

wobei a_{maske} die Abmessung der Maske in der Abbildungsebene ist.

Die Test-DOEs 1 und 2 wurden hauptsächlich dazu konzipiert um zu untersuchen, inwiefern eine solche Substruktur durch thermisches Laserglätten entfernt werden kann. Die Flächen sind groß genug, um bei verschiedenen Strukturtiefen Messungen der mittleren Rauheit durchzuführen.

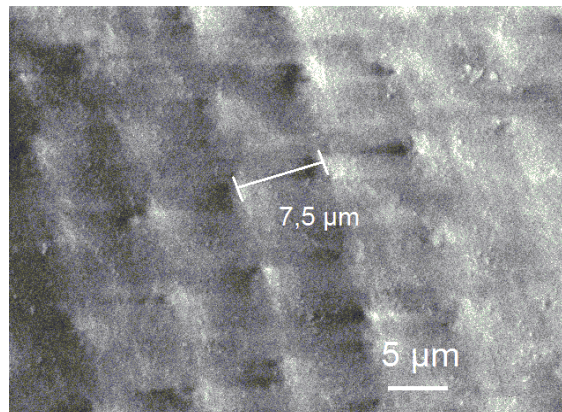


Abbildung 34: Substruktur der Oberfläche von Test-DOE 4

Um die Auswirkungen dieser Substruktur und die der Glättung auf das Beugungsmuster eines DOEs zu untersuchen, wurden zwei weitere Test-DOEs erstellt, welche ein optisches Gitter enthalten.

Test-DOE 3

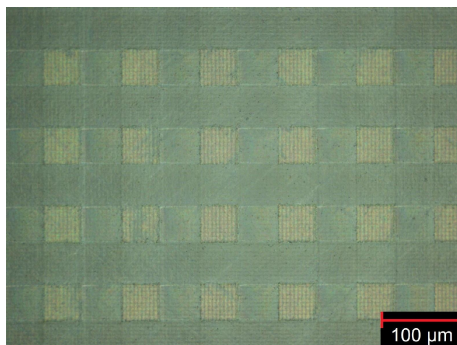


Abbildung 35: Test-DOE 3

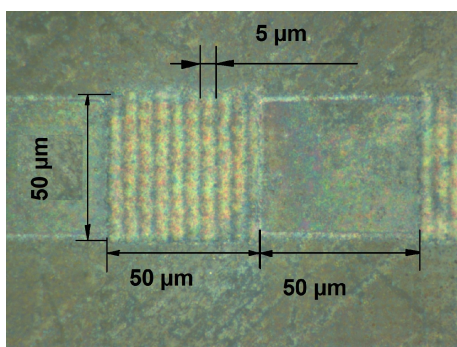


Abbildung 36: Test-DOE 3

Um die Substruktur der Rillen aufzubringen, wurde im ersten Strukturierungsschritt eine 5 x 5 mm² große Fläche mit folgenden Parametern strukturiert (s. Abb. 35 und 36):

Maske: Quadratisch, 50 µm Kantenlänge
in der Abbildungsebene

Laser: 120 Hz Pulsfrequenz

2 J/cm² Fluenz

90% ÜLP

Das optische Gitter wurde anschließend mit der gleichen Maske hergestellt, indem jeweils im 100 µm – Abstand Stege abgetragen wurden (s. Abb. 37). Sie wurden so angelegt, dass die Phasendifferenz für angrenzende Felder gemäß [2.12] gleich $\pi/2$ ist, bei einer Wellenlänge von 500 nm.

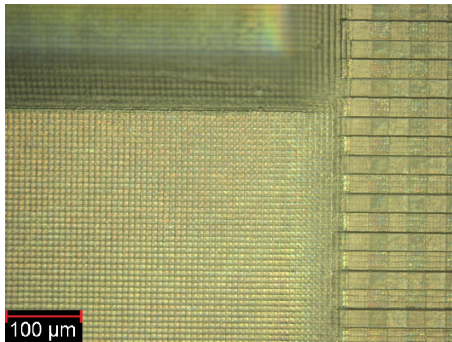
Test-DOE 4

Abbildung 37: Test-DOE 4

Es handelt sich hierbei um eine Mischung aus Test-DOE 2 und 3. Es besitzt sowohl flächenhaft strukturierte Bereiche unterschiedlicher Tiefe, als auch ein optisches Gitter mit Substruktur. Im ersten Herstellungsschritt wurde eine Struktur gemäß Test-DOE 2 mit einer 75 µm-Maske (diese Angabe bezieht sich immer auf die Abbildungsebene) hergestellt.

Anschließend wurde mit einer quadratischen 25 µm – Maske gemäß Test-DOE 3 ein optisches Gitter mit 50 – µm-Periode erzeugt.

Es wurden folgende Oberflächenrauheiten gemessen:

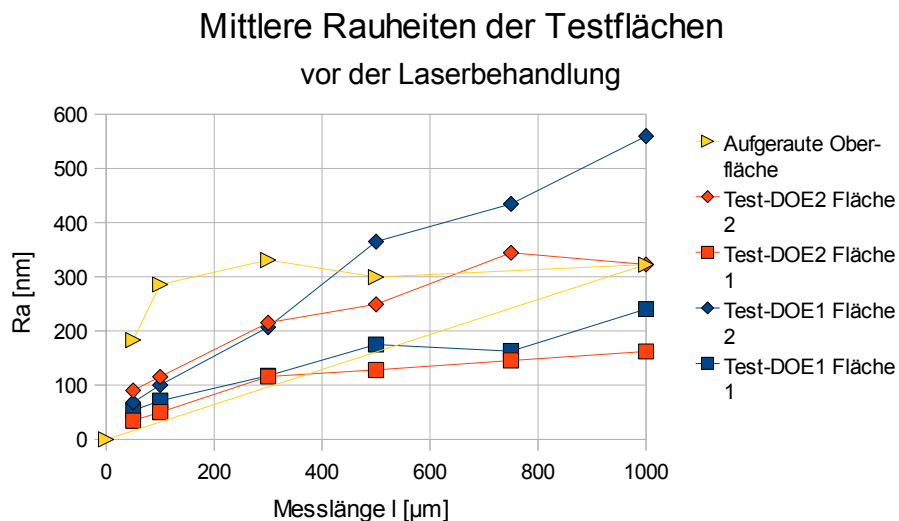


Abbildung 38: Oberflächenrauheiten vor der Laserbehandlung (s. Anl. 2)

Die mittlere Rauheit einer Fläche steigt mit der wachsenden Anzahl an Überfahrten, die für die Strukturierung benötigt werden. Bedingt dadurch, dass der Abtrag direkt von der auf dem Substrat ankommenden Pulsenergie bzw. Fluenz des Lasers abhängt. Die Leistung von Excimerlasern unterliegt während des Betriebes Schwankungen. Diese setzen sich mit jeder abgetragenen Schicht fort. Zusätzlich kann ein Inertgaseinlass in den Strahlengang die Strahlleistung kurzzeitig herabsetzen, da durch diesen das Gas vor dem Energiemonitor regeneriert wird und dieser daraufhin die Leistung nach unten regelt.

3.5. Theorie der Kantenverrundung

Jede integrierbare Funktion kann über eine Fouriertransformation in ein Frequenzspektrum zerlegt werden [PAP]. Die raue Oberfläche und der Querschnitt einer Kante kann als eine kontinuierliche Funktion dargestellt werden (s. Kap. 2.3.).

Thermisches Laserglätten dämpft den Anteil des bei der Transformation entstehenden Frequenzspektrums mit kurzer Oberflächenwellenlänge besonders gut (s. Abb. 18), höhere Wellenlängen bleiben durch dieses Glättungsverfahren nahezu unbeeinflusst. Dies legt eine Tiefpassanalogie nahe.

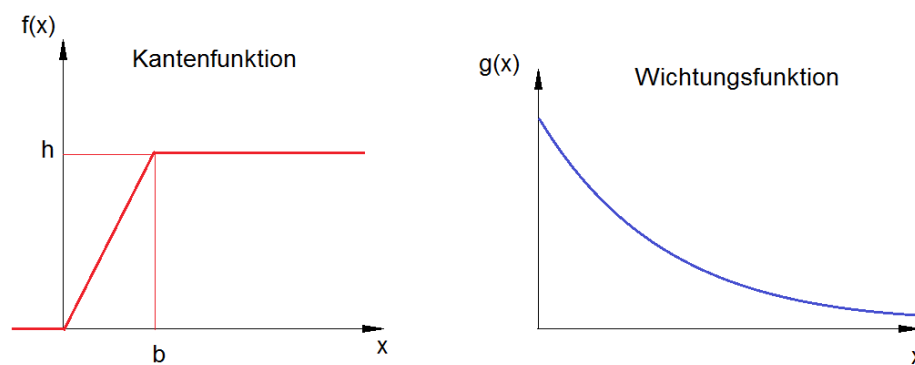


Abbildung 39: Kantenfunktion und Wichtungsfunktion

Die Wichtung einer Funktion $F(k)$ im Fourierraum mit einer zweiten Funktion $G(k)$, wobei k für räumliche Funktionen definiert ist als $k = 2\pi/\lambda$, der Kreiswellenzahl der Oberflächenwellen, kann mit einem Faltungsintegral beschrieben werden. Dieser Umstand wird durch den Faltungssatz beschrieben [BUT]. Die Kantenform kann mit folgender Funktion dargestellt werden:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq 0 \\ \frac{h}{b}x & \text{für } 0 < x \leq b \\ h & \text{für } x > b \end{cases} \quad [7.1]$$

$g(x)$ entspricht der Sprungantwort eines Tiefpasses, wobei hier eine beidseitige Exponentialfunktion gewählt wurde. Der Faktor $\frac{1}{2}$ entsteht durch die Normierungsbedingung welche besagt, dass die Fläche unter der Wichtungsfunktion 1 sein muss.

$$g(x) = \frac{\beta}{2} e^{-\beta|x|} \quad [7.2]$$

Hier charakterisiert β die Glättung. Je größer β ist, desto schlechter wird das Glättungsergebnis. Die Fouriertransformierte $G(k)$ von [7.2] ist [BUT]:

$$G(k) = \frac{1}{1 + \frac{k^2}{\beta^2}} \quad [7.3]$$

Für $\beta \rightarrow \infty$ strebt die Funktion [7.3] gegen 1, was der Fouriertransformierten eines Dirac-Impulses entspricht, welcher die Ausgangsfunktion $f(x)$ bei Faltung unverändert lässt. Das Faltungsintegral wird berechnet über

$$f_F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cdot g(x-\tau) d\tau \quad [7.4]$$

Wobei $f(\tau)$ gleich $f(x)$ aus [7.1] ist. Der Schwerpunkt der Kantenfunktion sollte sich nach der Faltung nicht verschieben, da die Lage des Koordinatensystems keinen Einfluss auf die Form der Kante nach der Glättung haben kann. Der Schwerpunkt einer Funktion verschiebt sich nach der Faltung nur dann nicht, wenn sie mit einer geraden Funktion gefaltet wird [BUT]. Dadurch ergibt sich die Forderung nach einer beidseitigen Exponentialfunktion als $g(x)$. Bedingt durch deren Unstetigkeitsstelle wird [7.4] zu:

$$f_F(x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cdot \beta e^{-\beta(x-\tau)} d\tau - \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cdot \beta e^{-\beta(\tau-x)} d\tau}{2} \quad [7.5]$$

Was der Mittelwertbildung aus 2 Faltungsintegralen entspricht. Für $h=5$, $b=2$ und unterschiedliche β nimmt die Lösung folgende Form an:

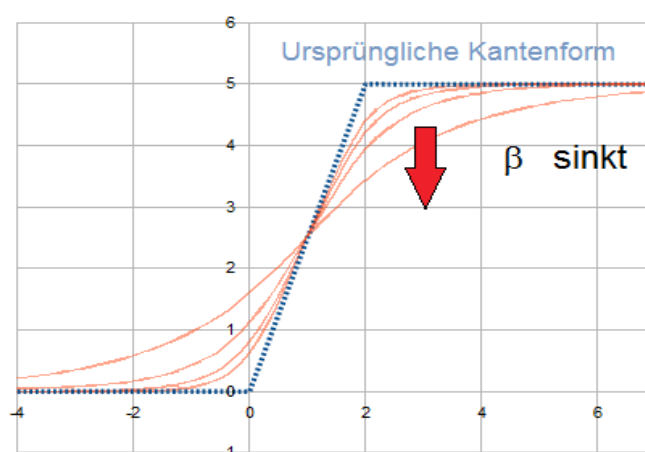


Abbildung 40: Typische Kantenform nach der Glättung für unterschiedliche β

Dies entspricht einer Umverteilung von Material durch das Aufschmelzen.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1. Kriterien für eine erfolgreiche Glättung

Bei den durchgeführten Versuchen wurden eine Reihe von Effekten festgestellt, die durch die Einwirkung der Laserstrahlung immer auftraten. Aus diesen gehen die Kriterien für eine erfolgreiche thermische Laserglättung hervor. Sie sind, unabhängig vom gewählten Lasertyp, immer gleich und sollen im Folgenden aufgeführt werden.

4.1.1. Schwellleistung

Die Zerstörschwelle ist die Leistung, bei der ein Materialabtrag des Substrates einsetzt. Diese sollte zu keinem Zeitpunkt überschritten werden.

Die Verdampfung von Quarzglas setzt bei einer Temperatur von etwa 2230 °C ein. Um diese Temperaturschwelle nicht zu überschreiten, wurde für den Laser FEHA SM600P eine pyrometrische Temperaturüberwachung vorgesehen. Die Fläche wurde vom Laser so schnell mehrmals hintereinander abgescannt ($v = 1000 \text{ mm/s}$), dass die gesamte Fläche gleichmäßig erwärmt wurde. Somit war eine pyrometrische Leistungsüberwachung möglich, obwohl der Laserstrahl sich relativ zum Pyrometermesspunkt bewegt.

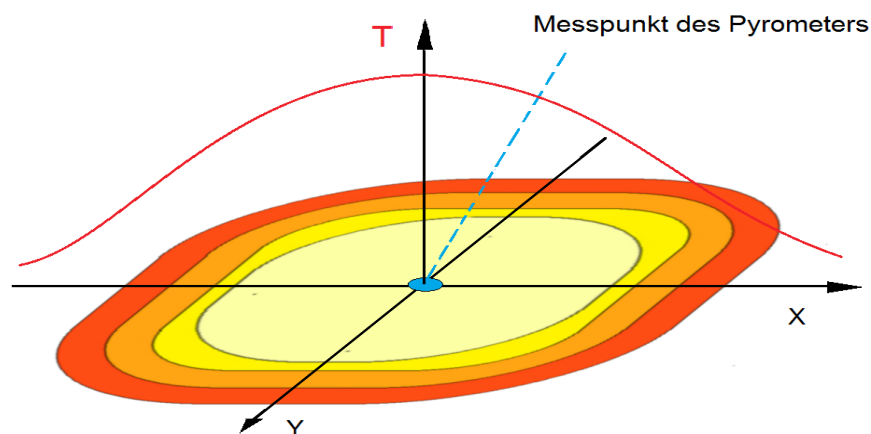
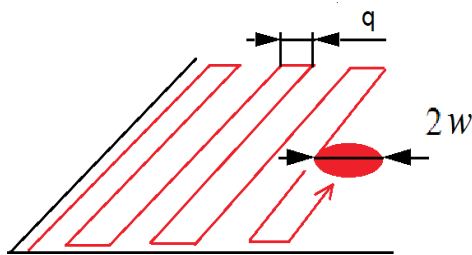


Abbildung 41: Entstehendes Temperaturfeld bei schneller Rasterung

Durch Wärmeleitungsprozesse stellte sich ein Temperaturgefälle von der Mitte der behandelten Fläche zu deren Rändern hin ein (s. Abb. 41). Um eine Überschreitung der Maximaltemperatur zu vermeiden, muss die pyrometrische Messung der Temperatur möglichst genau in der Mitte des Feldes erfolgen, da an dieser Stelle die höchste Temperaturbelastung auftritt. Das Pyrometer sollte das Messglied eines

Regelkreis bilden, welcher gewährleistet, dass die Zerstörschwelle vom Laser nicht überschritten wird. So würde sich die Laserglättung auch gut in eine industrielle Prozesskette integrieren lassen.

Die Möglichkeit einer pyrometrischen Temperaturmessung war für den Laser Synrad 57-2 nicht gegeben, da aufgrund der geringen Leistung des Lasers nur in unmittelbarer



Nähe zu einem kleinen Fokus die Schmelze entstehen konnte und der Messpunkt des Pyrometers starr im Verhältnis zum Substrat ist. Auf der gesamten Fläche des abgescannten Feldes eine Schmelze entstehen zu lassen, ist aufgrund der geringen Leistung des Lasers nur bei sehr kleinen Feldgrößen möglich.

Abbildung 42: mäandrierförmige Rasterung eines Feldes

Der Verfahrensweg ist in Abb. 42 dargestellt, wobei q der Ziele-zu-Zeile-Abstand und $2w$ ($= 2w_0$) der Strahldurchmesser am Bearbeitungsort ist. Um sich der Zerstörschwelle so gut wie möglich zu nähern, muss eine Versuchsreihe durchgeführt werden.

Da es sich bei Synrad 57-2 um einen gepulsten Laser handelt, kann anhand des Strahldurchmessers und der Pulsfrequenz der Vorschub bei gefordertem Pulsüberlapp (ÜLP) ausgerechnet werden:

$$\vec{v} = 2w f_L (1 - \text{ÜLP}) \quad [8.1]$$

wobei f_L die Pulsfrequenz des Lasers ist. Die benötigte Laserleistung kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\frac{P_{av}}{w^2 \cdot v} = \text{const} \quad [8.2]$$

Bei einem bekannten Wertepaar mit optimalem Glättungsergebnis v_b und $P_{av,b}$ und bekanntem Strahldurchmesser im Abstand z zur Strahltaile $w(z)$ gilt für die benötigte Leistung näherungsweise:

$$P_{av,soll} = P_{av,b} \frac{w(z)^2 \cdot v}{w_0^2 \cdot v_b} \quad [8.3]$$

Um eine theoretische Vorhersage machen zu können, wurde für die Bearbeitung im Fokus ($w(z) = w_0$) der F-Teta-Optik ein Vorschub v_b von 70 mm/s gewählt. Es wurde festgestellt, dass bei einer Leistung P_{avb} von 12 W eine optimale Glättung erreicht wird. Die sich aus Gleichung [8.3] ergebenden Werte für die theoretische optimale Leistung wurde in Abb. 43 eingetragen (gelb). Abweichungen entstanden zum einen durch Wärmeleitung und Wärmespeicherung im Material und zum anderem durch die Schwankungen der Laserleistung, welche statistisch verteilt sind.

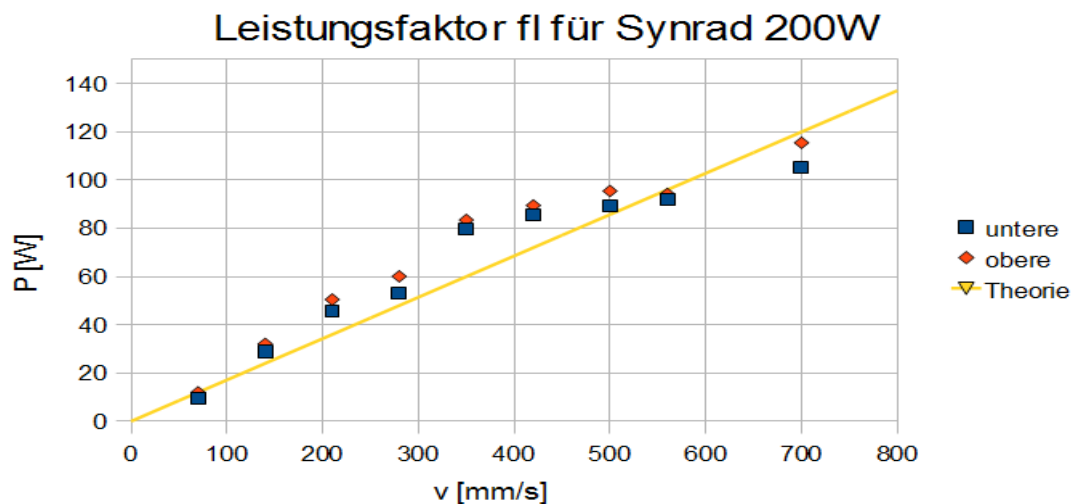


Abbildung 43: Abtragsschwellen für Synrad 57-2 (s. Anl. 3)

In Abb. 43 sind die experimentell ermittelten Grenzen aufgeführt, ab welchen ein Abtrag stattfindet. Der Laser Synrad 57-2 unterliegt während des Betriebes Leistungsschwankungen von $\pm 5\%$, was zur Folge hatte, dass durch Leistungsspitzen ein stellenweiser Abtrag von Material auf der Substratoberfläche stattfand, sobald die Schwellleistung überschritten wurde.

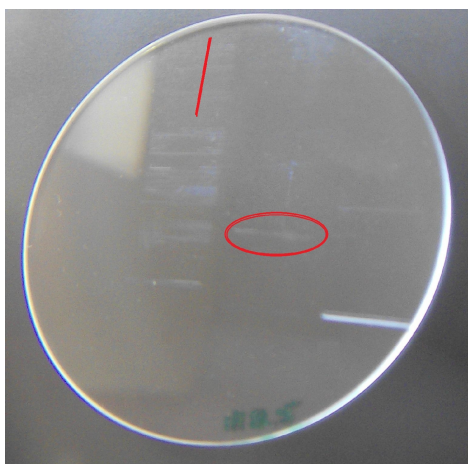


Abbildung 44: Glasplatte nach Laserbehandlung mit verschiedenen Leistungen

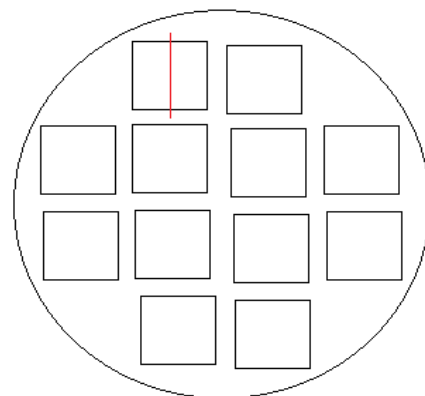


Abbildung 45: Anordnung der Testflächen auf dem Substrat

Die rote Linie in Abb. 44 und 45 markiert die Messstrecke für das Profilometer Sloan Dektak 3030. Für eine Fläche mit stellenweiser Überschreitung der Verdampfungs-temperatur wurde folgendes Profil gemessen:

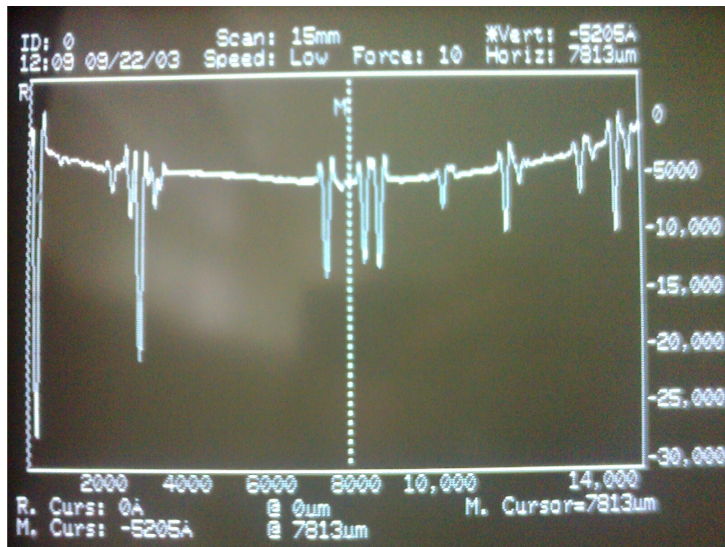


Abbildung 46: Oberflächenprofil bei Überschreitung der Schwellleistung

In Abb. 46 ist deutlich zu sehen: Die Tiefe des Abtrages kann mehrere Mikrometer betragen (Angabe der Höhe in Abb. 46 in Å)

4.1.2. Deformation und thermische Spannungen

Verformungen und thermische Spannungen sollten minimal oder nicht vorhanden sein, da diese die Präzision der Optik verschlechtern bzw. die Bruchgefahr erhöhen (s. 2.1.).

Bereits Abb. 46 lässt eine konkave Krümmung der Oberfläche erkennen. Um die Form der gesamten Oberfläche erfassen zu können, wurde das Profil der behandelten Glasscheibe aus Abb. 44 auf einer Länge von 4 cm vermessen, sowohl auf dessen Vorderseite als auch der Rückseite.

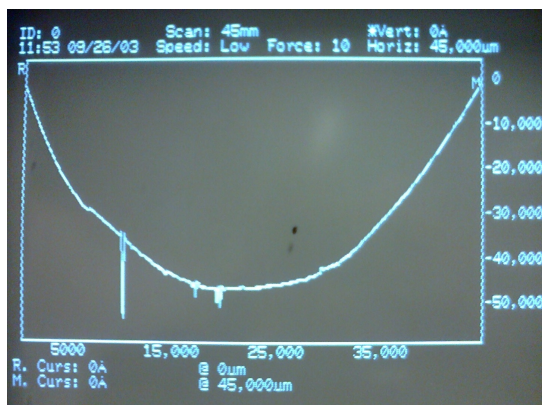


Abbildung 47: Vorderseite des deformierten Substrates



Abbildung 48: Rückseite

Die Profile in den Abbildungen 47 und 48 weisen starke Ähnlichkeiten in der Form und Ausprägung auf. Dies lässt vermuten, dass sich die Verformung nicht nur auf den vom Laser beeinflussten Bereich beschränkt und auch nicht durch eine Verdampfung des Materials ausgelöst wurde.

Als Ursache der Deformation wird folgender Mechanismus vermutet:

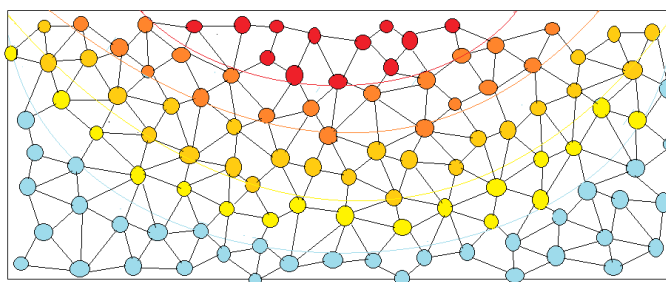


Abbildung 49: Deformation durch Lasereinstrahlung 1

Der Abstand der Atome in Gläsern ist statistisch verteilt. Durch die kurzzeitige Lasereinstrahlung werden oberflächennahe Schichten wesentlich stärker erwärmt als tiefer gelegene. Es entsteht ein großes Temperaturgefälle.

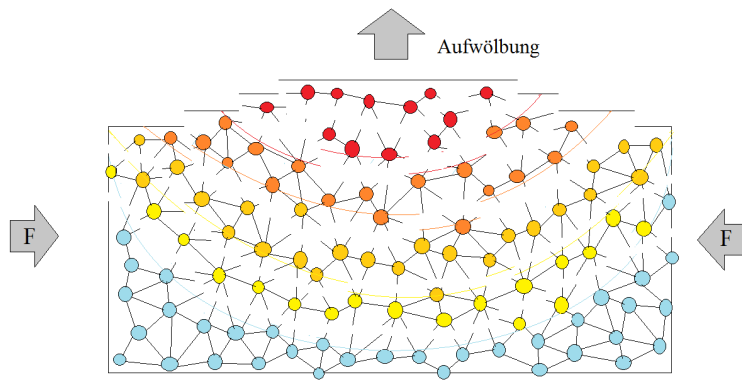


Abbildung 50: Deformation durch Lasereinstrahlung 2

Die Abnahme der Viskosität. Die kalten Bereiche üben eine Gegenkraft aus. Es kommt zu einer Aufwölbung.

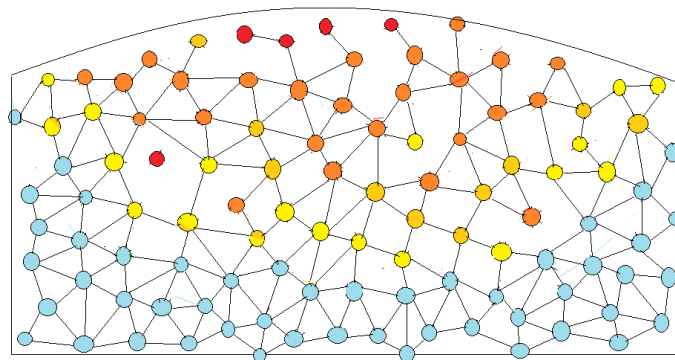


Abbildung 51: Deformation durch Lasereinstrahlung 3

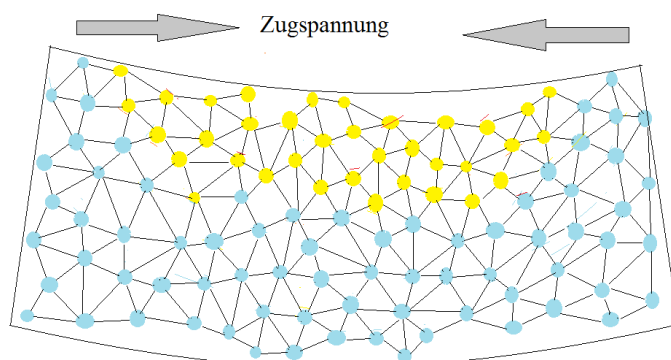


Abbildung 52: Deformation durch Lasereinstrahlung 4

Durch den Wärmeeintrag beginnen die Atome zu schwingen, üben dadurch eine größer werdende Kraft auf die Nachbaratome aus und stoßen sich untereinander ab. Dies führt in den wärmeren Bereichen dazu, dass Atombindungen teilweise unterbrochen werden, daraus resultiert

In den erwärmten Bereichen besitzen die Atome eine höhere Diffusivität als in den kälteren. Sie nehmen neue Gitterplätze ein, um die entstandenen Spannungen abzubauen. Mit der Abkühlung sinkt der mittlere Atomabstand auf das Ausgangsmaß. Dabei bauen sich Zugspannungen auf, die das Substrat verformen (s. Abb. 52). Die in dieser Arbeit verwendeten Proben besitzen eine Dicke von 1,45 mm, bei dickeren Proben oder spröderem Material können die sich ausbildenden inneren Spannungen zur Rissbildung oder Zerstörung führen. Um dies zu vermeiden, kann eine

Substratheizung verwendet werden. Diese sollte eine höchstmögliche Temperatur unterhalb des Transformationsbereiches für Glas (s. 2.2.) erreichen. Das Ausmaß der Verformung konnte unter Verwendung einer Heizplatte, welche die Proben auf eine Temperatur von $T > 400\text{ °C}$ heizt nachweislich reduziert werden. Es ist darauf zu achten, die Probe nicht unmittelbar nach der Laserbehandlung von der Heizplatte zu entfernen, da der Temperaturschock die Proben zerstören könnte.

Bei der Behandlung mit der Laseranlage FEHA SM600P sorgte ein weiterer Effekt für eine wesentlich stärkere Verformung. Diese war bereits mit dem Auge wahrnehmbar. Gemäß 3. 2. 2. liegt die Glasplatte nicht direkt auf der Heizplatte auf, sondern wird von einer Halterung (s. Abb. 26) getragen. Verfahrensbedingt besaß der Laser eine lange Interaktionszeit mit der Glasoberfläche. Die dabei entstehende Wärmemenge breitet sich über Wärmeleitung während der Behandlung im Substrat aus. Die Viskosität tiefer gelegener Schichten des Substrates wird herabgesetzt. Da der duktile Bereich frei über der Heizplatte hängt, wird er durch die Schwerkraft deformiert. Je länger die Interaktionszeit des Lasers mit der Oberfläche dauerte oder je höher die Maximaltemperatur war, desto stärker war dieser Effekt. Bei Verwendung eines Lasers mit höherer Leistung und größerem Vorschub, sollte eine geringere Verformung auftreten.

4.1.3. Gleichmäßige und durchgängige Glättung

Es sollte eine gleichmäßige, durchgängige und mit dem Auge erkennbare Glättung der Testfläche stattfinden. Diese sollte durch deutliche Unterschiede zwischen den mittleren Rauheiten vor und nach der Laserbehandlung nachweisbar sein.

Bevor die Glättung mit einer Messung der Rauheit beurteilt werden kann, muss gewährleistet werden, dass jeder Bereich der behandelten Fläche gleichmäßig geglättet wird. Für die Laseranlage Synrad 200 W soll zu diesem Zweck auf einer aufgerauten Quarzglasplatte eine Reihe von Testfeldern mit unterschiedlichen Parametern angelegt werden (Anordnung gemäß Abb. 45). Als Leistung und Vorschub werden die aus 4.1.1. hervorgehenden Wertepaare verwendet (s. Abb. 43).

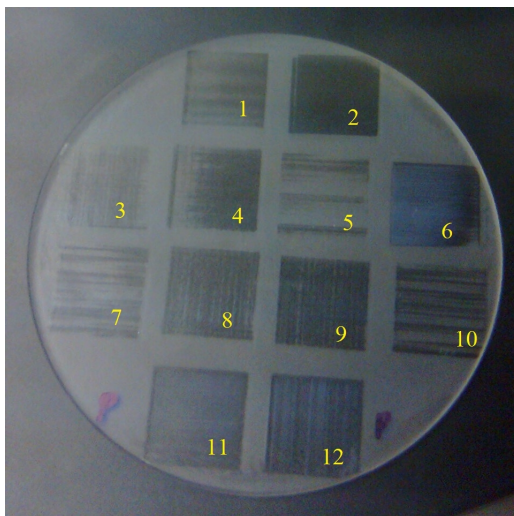


Abbildung 53: Testfelder auf einer aufgerauten Quarzglasoberfläche

Feld	ÜLP [°]	p [µm]	v [mm/s]	P [W]
1	0,95	10	70	10
2	0,95	10	70	11,5
3	0,5	140	700	115,5
4	0,5	140	700	107,5
5	0,7	80	420	89
6	Fehlerhafte Durchführung			
7	0,9	30	140	32
8	0,7	80	420	95,5
9	0,7	80	420	89,5
10	0,75	70	350	84
11	0,5	10	700	115
12	0,5	10	700	103,5

Tabelle 6: Bearbeitungsparameter der Testfelder in Abb. 53

Für alle Glättungsversuche betrug der Strahldurchmesser 140 μm . Deutlich zu sehen ist in den Feldern 5, 7 und 10 in Abb. 53, dass sich geglättete und ungeglättete Bereiche abwechseln. Ein Effekt, der auch in den Feldern 3, 4 und 9 auftrat. Um eine vollständige Glättung zu gewährleisten, wurden diese Flächen mehrmals hintereinander bearbeitet, jedoch konnten die ungeglätteten Bereiche nicht vollständig entfernt werden. Das gleichmäßigste Ergebnis lieferte der Parametersatz der Felder 1 und 2 (s. Tabelle 6). Nach einer Überfahrt des Lasers war eine durchgehende Glättung wahrnehmbar.

Die Ursache hierfür ist die Leistungsschwankung des Lasers: Für ein optimales Glättungsergebnis existiert nur ein sehr schmales Parameterfeld. Bei zu hoher Leistung verdampft das Glas, bei zu niedriger reduziert sich der Glättungseffekt drastisch. Der optimale Leistungsbereich wird während der Schwankungen in unregelmäßigen Abständen erreicht. Je langsamer der Vorschub v desto näher rücken die dadurch geglätteten Bereiche zusammen. Durch mehrmalige Glättungsüberfahrten (im Folgenden als GÜF bezeichnet) kann das Ergebnis hinsichtlich Homogenität und Glättung zusätzlich optimiert werden. Es empfiehlt sich, für diesen Lasertyp einen möglichst geringen Vorschub bei mehrmaligen mäanderförmigen Überfahrten zu wählen.

Bei der Laseranlage FEHA SM600P hängt die Qualität der Glättung von der erreichten Oberflächentemperatur ab. Da sich bei der Behandlung ein Temperaturgefälle von der Mitte des Feldes nach außen hin herausbildete, wurden am Rand eines Feldes gelegene Bereiche auf eine niedrigere Temperatur erwärmt und dadurch weniger stark geglättet als Bereiche in der Mitte. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, kann der abgescannte Bereich im Verhältnis zum zu glättenden vergrößert werden. Genauere Untersuchungen zu diesem Sachverhalt werden im folgenden Kapitel erläutert.

4.2. Glättungsversuche

4.2.1. Glättungsversuche an einer aufgerauten Quarzglasoberfläche

Vor der Glättung wurde die mittlere Rauheit der Glasscheibe bei unterschiedlichen Messlängen mittels Profilometer vermessen. Die Messung bei einer Messlänge l unterdrückt den Einfluss von Oberflächenwellenlängen, die eine deutlich größere Wellenlänge haben als l . So konnte eine erste Einschätzung der Oberflächenwellenlängenabhängigkeit der Laserlätzung getätigt werden. Es wurden folgende mittlere Ausgangsrauheiten $R_{a\text{ vor}}$ gemessen:

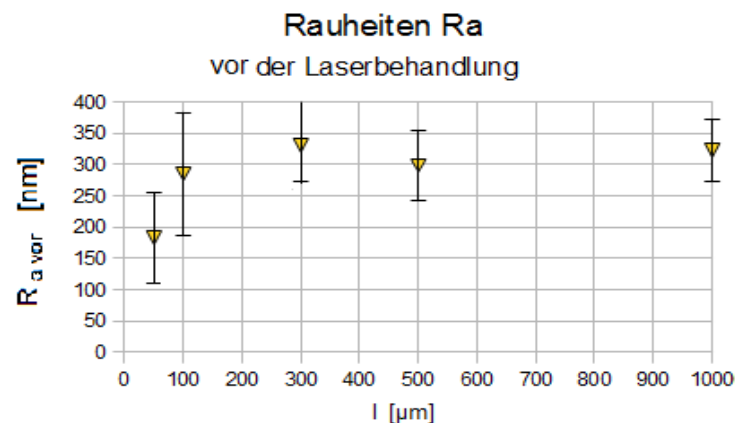


Abbildung 54: Rauheiten der aufgerauten Oberfläche (s. Anl. 4)

Mit der Laseranlage Synrad 57-2 wurden jeweils erst drei und anschließend sieben weitere GÜF bei der oberen und unteren Leistungsgrenze (s. Abb. 43) durchgeführt, wobei die Bearbeitungsparameter der Felder 1 und 2 aus Abb. 53 verwendet wurden. Es wurden bei Messlängen zwischen 50 und 1000 μm die $R_{a\text{ nach}}$ gemessen

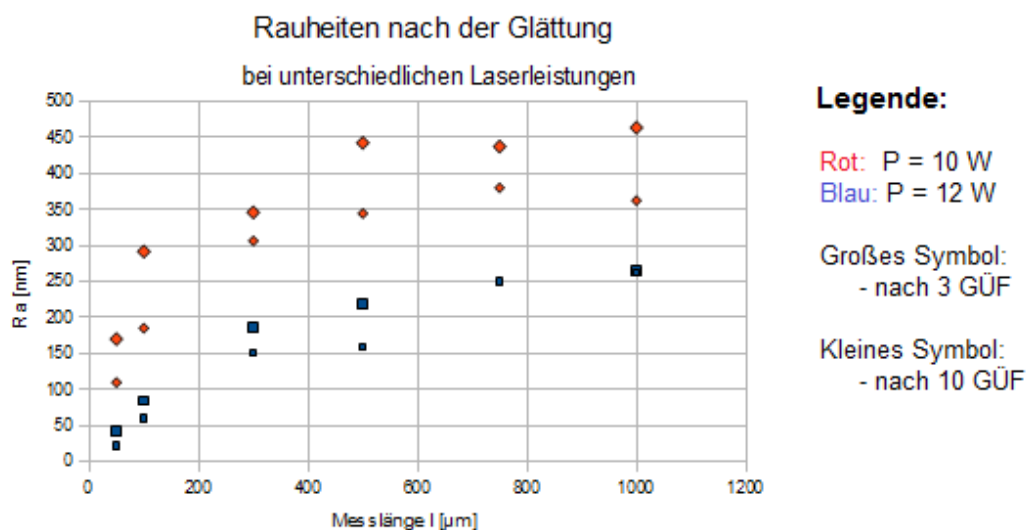


Abbildung 55: Oberflächenrauheiten nach GÜF (s. Anl. 5)

Der Grund dafür, dass die Rauheiten bei 10 W Laserleistung teilweise höher waren als die gemessenen Ausgangsrauheiten ist der, dass diese an verschiedenen Stellen des Substrates variierten. Da aber die beiden Testfelder direkt nebeneinander lagen, konnte davon ausgegangen werden, dass gemäß Abb. 56 die Laserleistung bei dieser Anlage einen wesentlich höheren Einfluss auf den Glättungserfolg hat, als die Anzahl der GÜF. Eine höhere Laserleistung konnte nicht gewählt werden, da sonst die Schwellleistung überschritten wird. Deshalb mussten beim Laser Synrad 57-2 mehrere GÜF getätigt werden, um einen maximalen Glättungserfolg zu erreichen. Mehr als 10 GÜF konnten die Oberflächenrauheit aber nicht mehr signifikant herabsetzen.

Der Quotient der Rauheiten $R_{a\text{ nach}} / R_{a\text{ vor}}$ zeigt folgendes Bild:

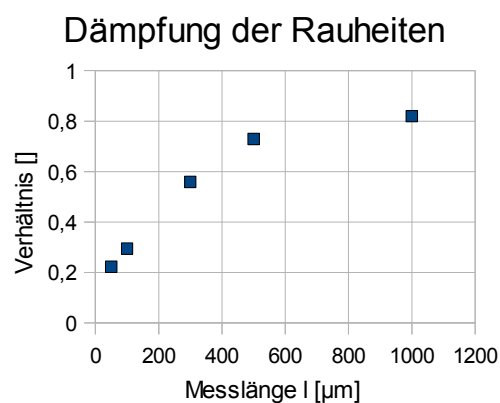


Abbildung 56: $R_{a\text{ nach}} / R_{a\text{ vor}}$ für Synrad 57-2

Die Ursache hierfür liegt in dem tiefpassähnlichen Verhalten der thermischen Glättung. Bei der Messung der R_a bei kurzen Messlängen haben größere Oberflächenwellenlängen keinen Einfluss. Da diese aber bei der Glättung weniger stark gedämpft werden, geht das Verhältnis $R_{a\text{ nach}} / R_{a\text{ vor}}$ für größere Messlängen gegen 1.

Da die Heizplatte zusätzliche thermische Energie in das Substrat einbringt, muss Gleichung [8.2] mit einem Vorfaktor versehen werden. Dieser konnte experimentell zu $0,83 \pm 0,03$ bestimmt werden. Damit sinkt die Leistung für eine optimale Glättung mit Synrad 57-2 bei den Parametern von Feld 2 auf 9,9 W.

Bei der Laseranlage FEHA SM600P wurde der Temperaturverlauf vor der Bearbeitung vorgegeben, die Laserleistung wurde dann vom Pyrometer nachgeregelt. Deshalb konnte auf eine Versuchsreihe zum experimentellen Ermitteln der optimalen Leistung verzichtet werden. Genau wie die Temperaturwerte wurden die mittleren Rauheiten der Oberfläche von der Mitte des Feldes aufgenommen. Grundsätzlich weist der Temperaturverlauf folgende Form auf:

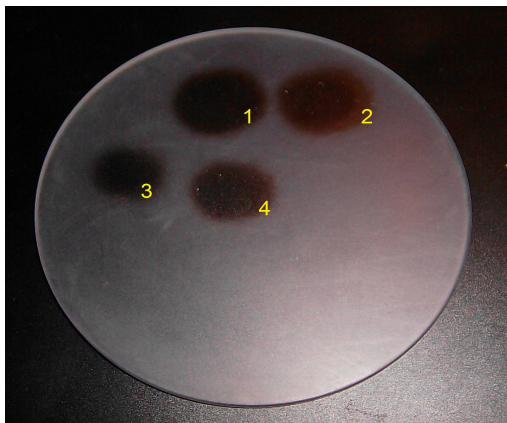


Abbildung 57: Testfelder der Glättungsversuche mit FEHA SM600P

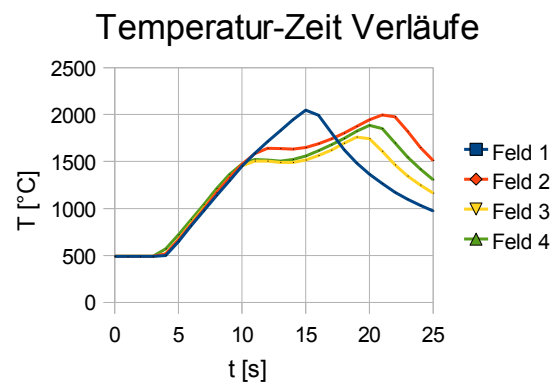


Abbildung 58: Temperaturverläufe in der Mitte der Testfelder

Die maximale Aufwärmgeschwindigkeit wurde durch die maximale Laserleistung und die Feldgröße begrenzt. Wird die Leistung des Lasers vom Pyrometer nach unten geregelt, entsteht ein Temperaturverlauf gemäß Feld 2, 3 und 4. Es gilt: je größer das Feld und je kleiner die maximale Laserleistung, desto mehr Zeit wurde zum Erreichen der Maximaltemperatur gebraucht, da es sich um einen Prozess handelt, welcher einem Gleichgewicht aus Wärmemengenzufuhr vom Laser und Abtransport durch Konvektion und Wärmeleitung entgegen strebt. Dasselbe galt für die maximal erreichbare Temperatur. Dies wirkte sich direkt auf die erreichbaren minimalen Oberflächenrauheiten aus. Es wurden folgende Oberflächenrauheiten bei unterschiedlichen Maximaltemperaturen erreicht:

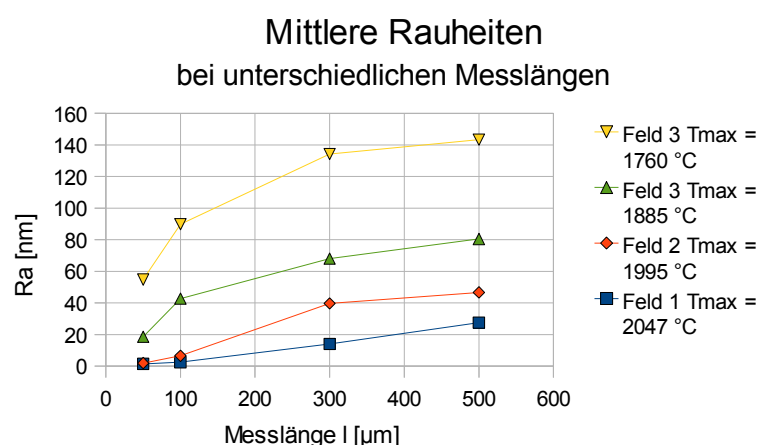


Abbildung 59: Abhängigkeit der mittleren Oberflächenrauheit von der Erreichten Maximaltemperatur (Anl. 10)

Abb. 60 zeigt deutlich den starken Einfluss der Maximaltemperatur auf den Glättungserfolg. Bereits ein Temperaturunterschied von 100 °C hatte eine signifikante Senkung der mittleren Oberflächenrauheit bei allen Messlängen zur Folge.

Bei einer Feldgröße von 3 x 3 cm² konnte mit einer Laserleistung von 520 W eine Maximaltemperatur von 1850 °C erreicht werden. Allerdings war die Temperaturverteilung dabei stark inhomogen und die Aufwärmgeschwindigkeit so gering, dass sich das Substrat sehr stark deformiert hat. Aus diesem Grund wird empfohlen, für diesen Laser, keine größere Feldgröße zu wählen als 2,5 x 2,5 cm².

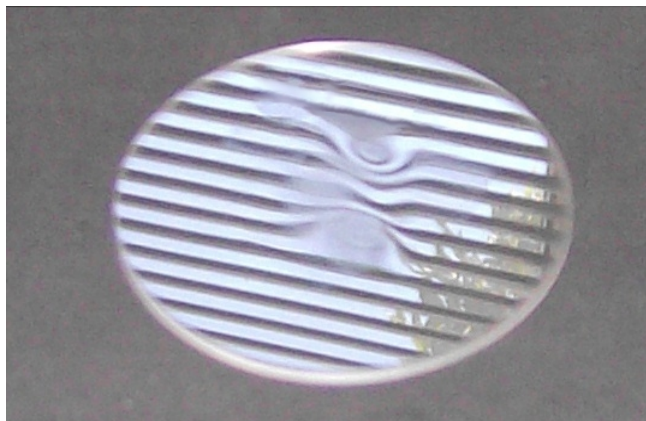


Abbildung 60: Durch Lasereinwirkung deformiertes Substrat

4.2.2. Glättungsversuche an den Test-DOEs

Alle Glättungsversuche an den Test-DOEs wurden mit dem in Kap. 4.2.1. für optimal befundenen Parametern für die Laseranlage Synrad 57-2 durchgeführt. Die Flächen wurden mehrmals, mit kurzen Abkühlphasen dazwischen, mäanderförmig abgerastert. Um Glättungserfolge zu bewerten, wurden nach jeweils drei und zehn GÜF mikroskopische Aufnahmen gemacht und Messungen der Rauheit R_a durchgeführt.

Test-DOE 1

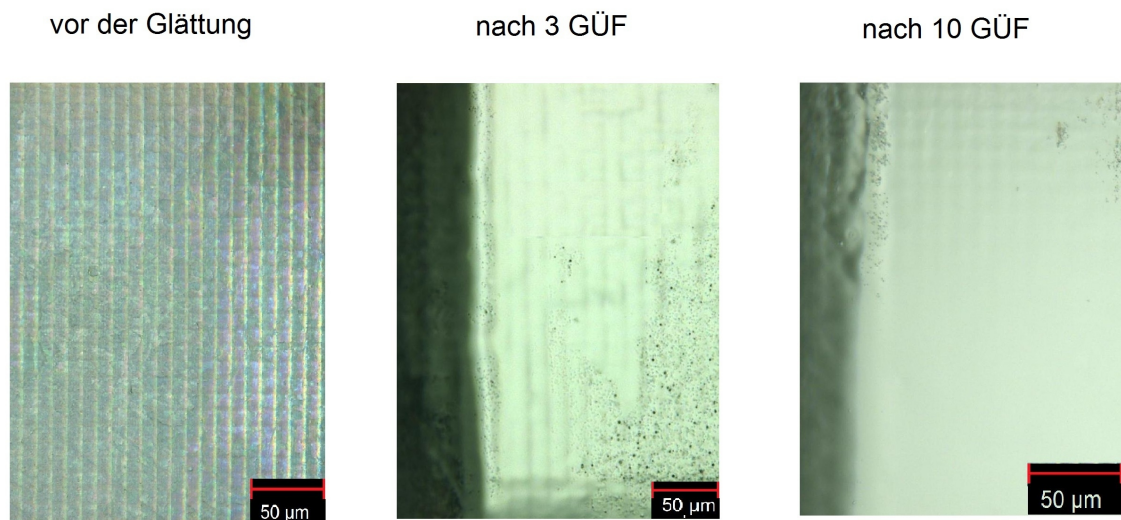


Abbildung 61: Glättung von Test-DOE 1 Fläche 1

Deutlich zu sehen ist, dass die Substruktur mit zunehmender Anzahl der GÜF abgerundet wurde. Nach 10 GÜF war sie bereits in großen Bereichen unter dem Auflichtmikroskop nicht mehr zu erkennen. Die mit 16 ÜF erzeugte Fläche 2 zeigte nach den Glättungen folgendes Bild:

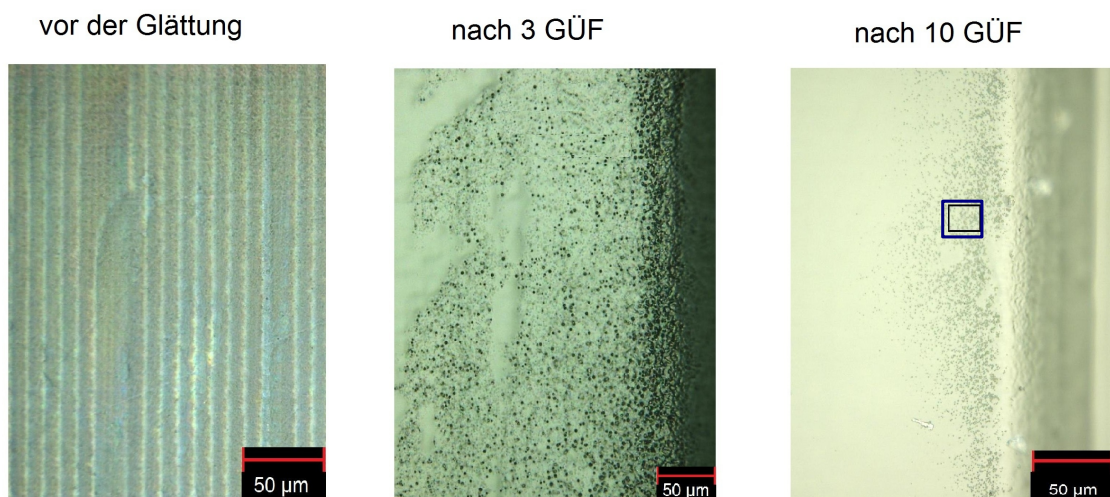


Abbildung 62: Glättung von Test-DOE 1 Fläche 2

Es wurde festgestellt, dass an den Rändern der tiefer gelegenen Flächen mit Höhenstufen von $> 30 \mu\text{m}$ verstärkt kleine Bläschen in das Glas eingeschlossen werden (Abb. 62 blaues Rechteck). Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die bei der Strukturierung entstehende Abprodukte sich bevorzugt an den Kanten ablagern, da sie dort nicht vom Crossjet abtransportiert werden können, bzw. angespült werden. Bei der Glättung wird nur die oberste Schicht erwärmt. Die entstehende Schmelze schließt Luft ein. Weitere GÜF konnten diese Luftpneinschlüsse nicht aus dem Glas entfernen. Ähnliches passierte auch bei der Glättung der mit Schleifpapier aufgerauten Oberfläche an Stellen, bei denen die Kratzer zu tief waren. Es konnten folgende Oberflächenrauheiten festgestellt werden:

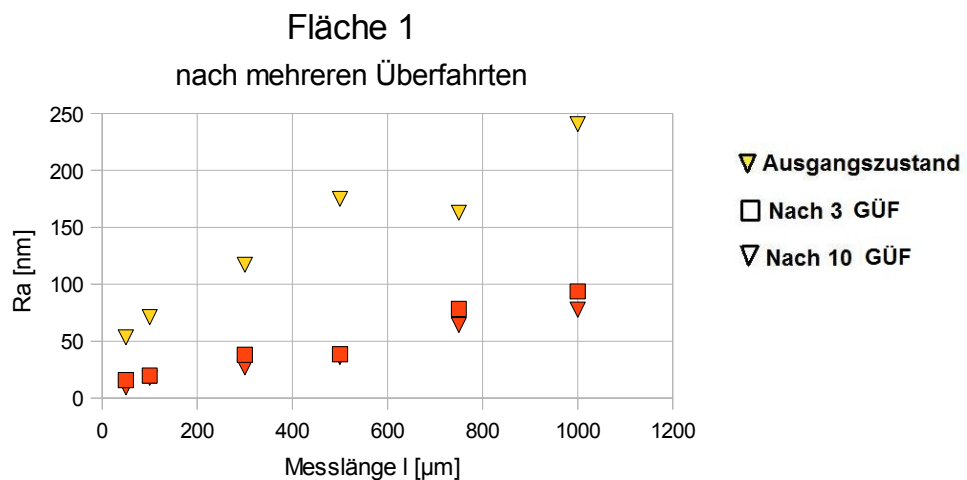


Abbildung 63: mittlere Oberflächenrauheiten von Test-DOE 1 Fläche 1 (s. Anl. 6)

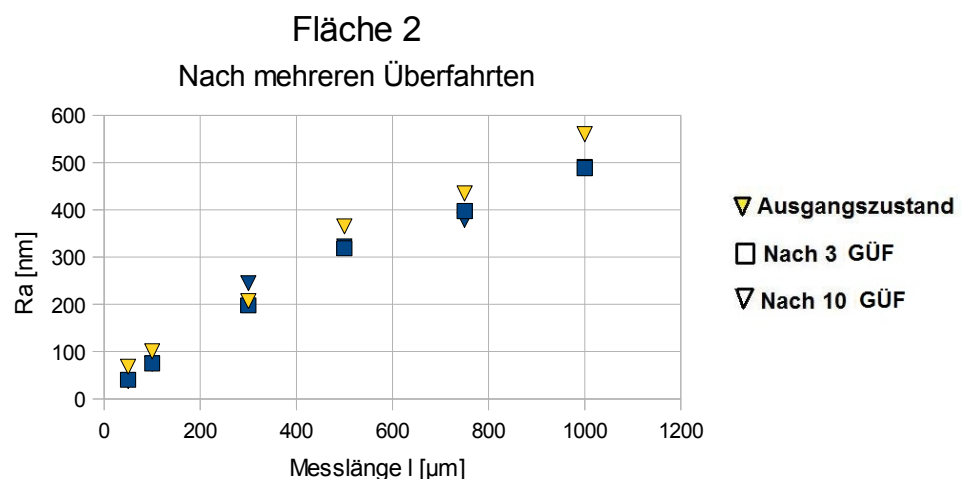


Abbildung 64: mittlere Oberflächenrauheiten von Test-DOE 1 Fläche 2 (s. Anl. 7)

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Glättungserfolg umso größer ist, je niedriger die Ausgangsrauheit ist. Dennoch kann die Oberflächenrauheit nicht auf den Ausgangswert einer unstrukturierten Fläche reduziert werden. Was die Verwendungsmöglichkeiten dieses Verfahrens auch für die Politur hochpräziser asphärischer Linsen und Freiformoptiken dahingehend einschränkt, dass die Ausgangsrauheit nicht größer als 100 nm sein darf, da die andernfalls zurückbleibende Welligkeit die optischen Eigenschaften zu stark beeinträchtigt.

Test-DOE 2

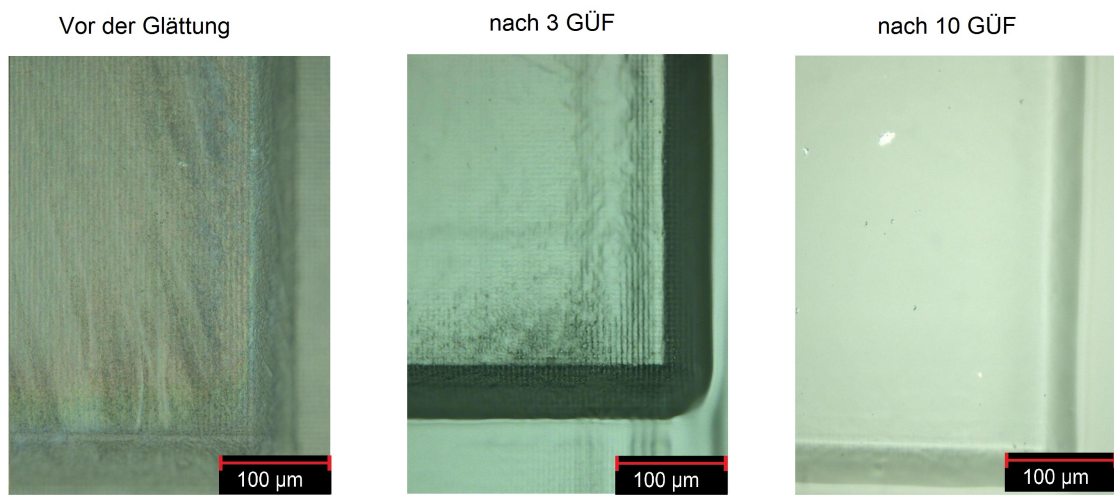


Abbildung 65: Glättung von Test-DOE 2 Fläche 2

In Abb. 65 ist die Anlagerung von Abprodukten (Debris) zu erkennen. Diese konnten durch die Glättung beseitigt werden, da für die Strukturierung der Fläche 2 von Test-DOE 2 nur 4 Überfahrten benötigt werden und dadurch weniger Abprodukte entstanden. Die Flächen konnten so weit geglättet werden, dass die Substruktur unter dem Auflichtmikroskop nicht mehr zu erkennen war. Unter extremer Blendeneinstellung wurde die Welligkeit der Oberfläche sichtbar, ebenso wie ein Strukturierungsfehler auf Fläche 2 (s. Abb. 66).

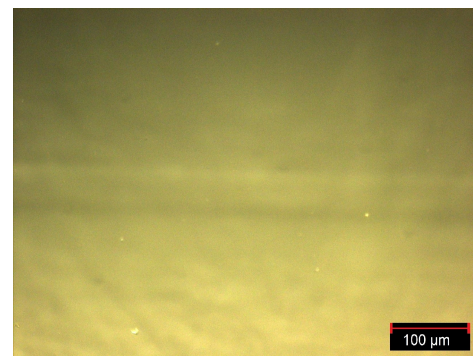


Abbildung 66: Welligkeit und Strukturierungsfehler von Fläche 2

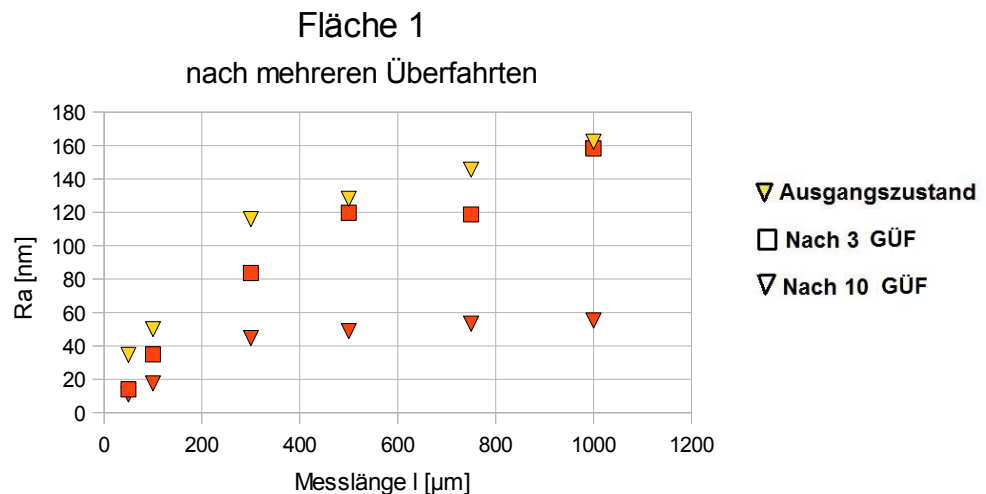


Abbildung 67: mittlere Oberflächenrauheiten von Test-DOE
1 Fläche 1 (s. Anl. 8)

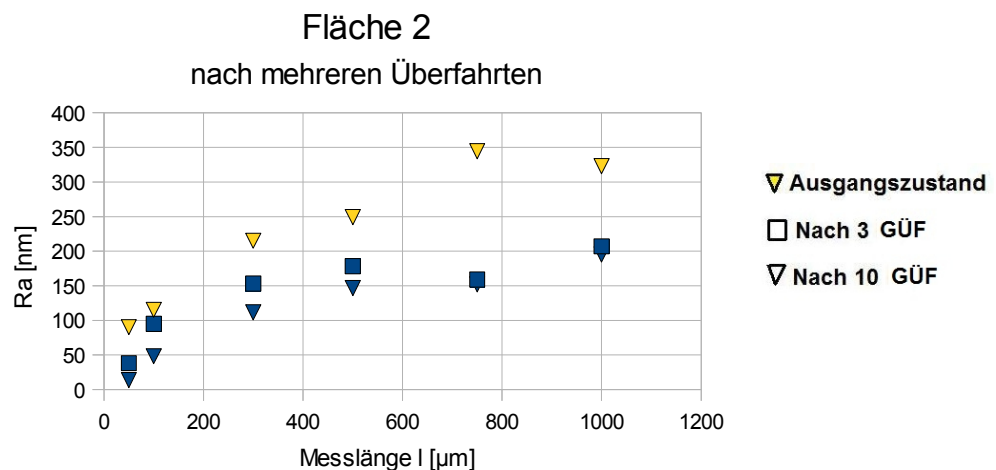


Abbildung 68: mittlere Oberflächenrauheiten von Test-DOE
1 Fläche 2 (s. Anl. 9)

Zwar konnte mit dem Laser Synrad 57-2 nicht die Oberflächenrauheit erreicht werden wie mit dem Laser FEHA SM600P, dennoch war eine Beseitigung der Substruktur gut möglich. Beide Lasertypen hinterlassen immer eine Welligkeit in der Oberfläche, bedingt durch das Tiefpassverhalten dieses Glättungsverfahrens. Mit dem Verfahren des Lasers FEHA SM600P erreichte die Welligkeit einen geringeren Wert als mit Synrad 57-2, dennoch wird von einer Verwendung einer Maximaltemperatur von mehr als 2000 °C abgeraten, da die Schmelzprozesse das Substrat zu stark verformen und die DOE-Struktur dadurch zu stark verrunden, bzw. bei zu kleiner Gitterperiode vollständig eingeebnet würden. Die Auswirkungen auf die optischen Eigenschaften und die Verrundung der Kanten sollen daher im nächsten Kapitel ausführlich untersucht werden.

4.2.3. Auswirkung der Glättung auf optische Eigenschaften

Die Test-DOEs 3 und 4 wurden erzeugt, um die Auswirkungen der thermischen Glättung auf das Beugungsbild (optische Antwort) zu untersuchen. Um die optische Antwort zu generieren, werden die Phasengitter dieser DOEs mit einem Laserpointer durchstrahlt. Auf dem Schirm ist folgendes zu erkennen:

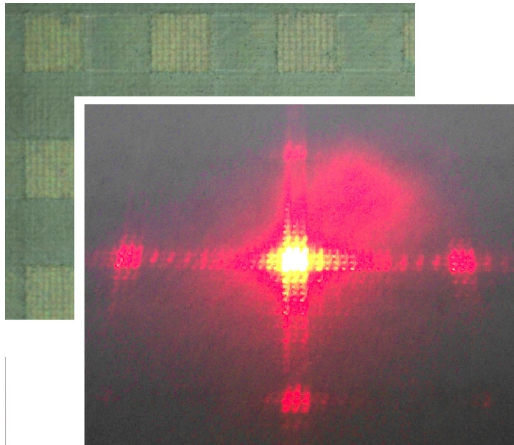


Abbildung 69: optische Antwort von Test-DOE 3 vor der Laserbehandlung

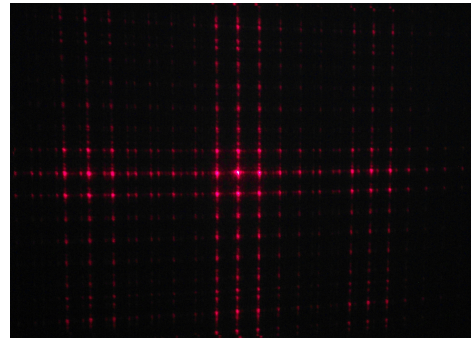


Abbildung 70: optische Antwort von Test-DOE 4 vor der Laserbehandlung

Dieses Muster erklärt sich durch folgende Überlegung: Die optische Antwort dieser DOEs ist eine Faltung aus zwei Beugungsbildern. Eines dieser Muster entsteht durch Beugung an dem mit der zweiten Strukturierungsphase gezielt angelegten Gitter mit 100 – bzw. 50 μm Gitterperiode. Diese ist relativ groß, sodass der Winkel zwischen benachbarten Intensitätsmaxima klein ist. Dieser Zusammenhang kann mit Hilfe der Gittergleichung berechnet werden, welche sich aus [2.6] ergibt. Hierbei handelt es sich um die Lage der Maxima der Lösungsfunktion für eine Blendenfunktion mit regelmäßig angeordneten Spalten der Gitterperiode p :

$$n \lambda = p \cdot \sin \rho_n \quad , \quad [9.1]$$

wobei n die Beugungsordnung ist. Gemäß dieser Formel hat die erste Beugungsordnung bei einer Gitterperiode p_{Gitter} von 100 μm (Test-DOE 3) in einer Entfernung von 2 m vom DOE auf dem Schirm einen Abstand von 1,23 cm von der nullten Beugungsordnung und bei $p_{\text{Gitter}} = 50 \mu\text{m}$ (Test-DOE 4) einen Abstand 2,6 cm. Die durch den ersten Strukturierungsschritt entstandene Substruktur wirkt ebenfalls wie ein optisches Gitter welches dem eigentlichen Gitter überlagert ist. Gemäß [6.1] besitzt diese eine Gitterperiode von $p_{\text{sub}} = 7,5 \mu\text{m}$ bei Test-DOE 4, laut [9.1] ergibt sich damit in

2 m Entfernung ein Abstand von 17,4 cm zwischen der nullten und der ersten Beugungsordnung. Eine Messung bei den angegebenen Entfernungen konnte die theoretische Vorhersage bestätigen. Das am Schirm zu sehende Muster ist somit gleich dem Beugungsbild welches bei einer Beugung eines Laserstrahls an zwei direkt hintereinander gelegenen Gittern mit unterschiedlicher Gitterperiode p entsteht (s. Abb. 71).

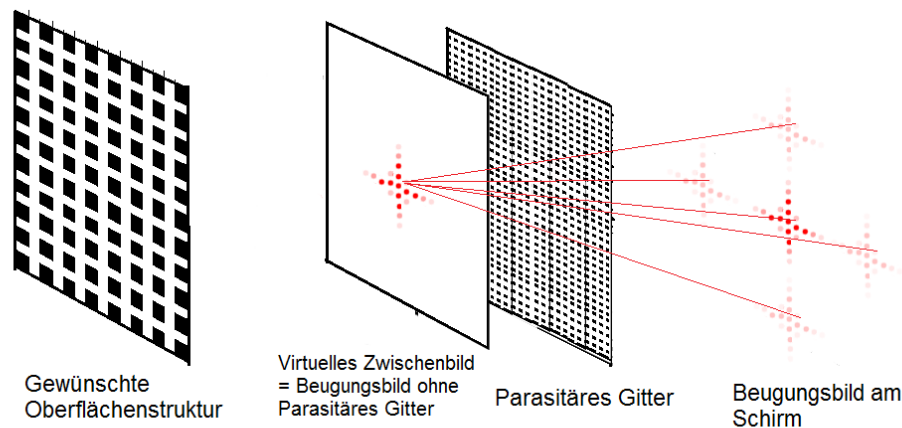


Abbildung 71: Entstehung des Beugungsbildes

Aus [9.1] geht hervor, dass die durch das parasitäre Gitter erzeugten Nebenmaxima um so weiter vom Hauptmaximum weg rücken, je kleiner der Abstand der Erhebungen der Substruktur zueinander ist, d.h. um so höher der ÜLP bei gleicher für die Strukturierung verwendeter Maske ist oder um so kleiner die Maske bei gleichem ÜLP ist (s. [6.1]). Vorangegangene Versuche an den Test-DOEs 1 und 2 haben gezeigt, dass die Substruktur durch mehrmalige GÜF beseitigt werden kann. Die Oberflächenstruktur und die optische Antwort verändern sich in folgender Weise durch die Laserbehandlung:

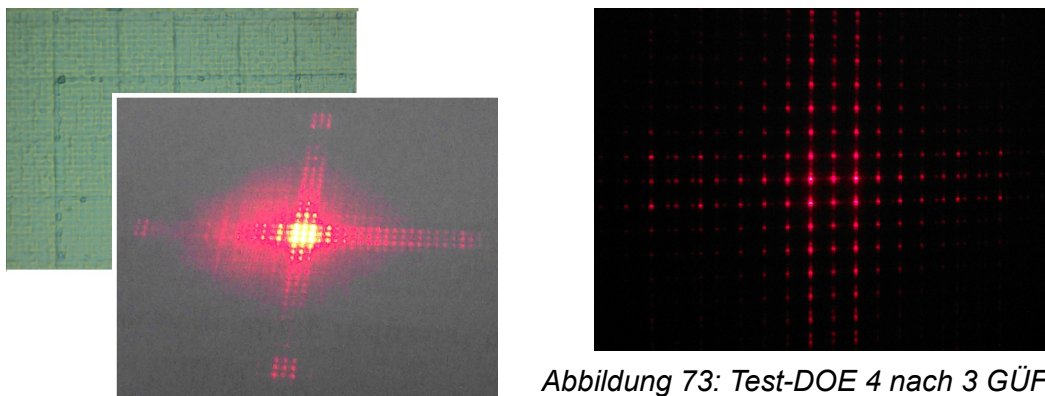


Abbildung 72: Test-DOE 3 nach 3 GÜF

Abbildung 73: Test-DOE 4 nach 3 GÜF

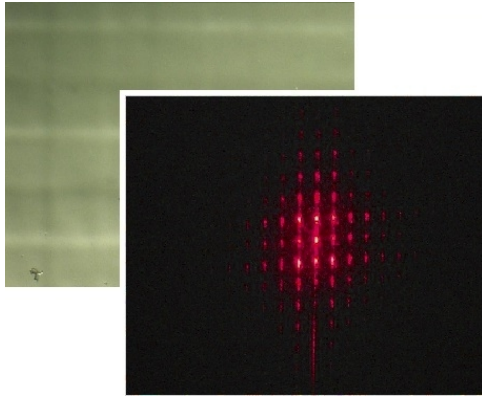


Abbildung 74: Test-DOE 3 nach 10 GÜF

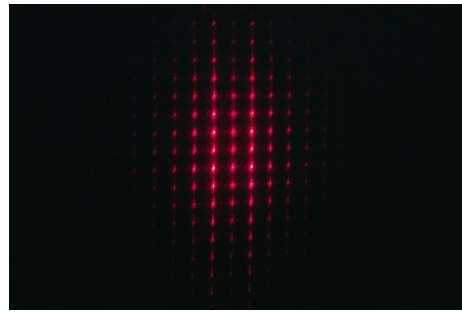


Abbildung 75: Test-DOE 4 nach 10 GÜF

Die Intensität der parasitären Nebenmaxima konnte deutlich gesenkt bzw. vollständig beseitigt werden. Allerdings sinkt auch die Qualität des gezielt erzeugten optischen Gitters. Deutlich wird der dabei entstehende Verlust an Beugungseffizienz beim Vergleich der optischen Antworten von Test-DOE 4 nach 10 GÜF und und einem weiteren Gitter, bei dem auf den ersten Strukturierungsschritt, welcher die Substruktur erzeugt, verzichtet wurde:

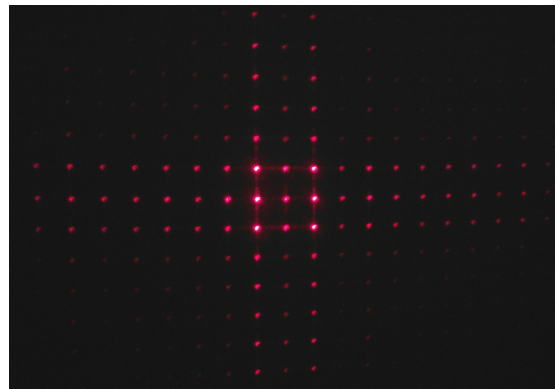


Abbildung 76: Optische Antwort ohne Glättung und ohne Substruktur

Dieser Unterschied lässt sich durch den Effekt der Kantenverrundung erklären. Durch die Abrundung der Kante entsteht zwischen den Höhenstufen des DOEs ein Übergangsbereich, welcher eine falsche Phaseninformation beinhaltet. Je breiter dieser im Verhältnis zur Gitterperiode wird, desto kleiner wird der Anteil an Elementarwellen mit richtiger Phaseninformation.

In Abb. 79 wurde ebenfalls die Best-fit-Funktion der theoretischen Vorhersage eingetragen (blau), wobei [7.2] als Wichtungsfunktion angenommen wurde. Die Größe β nimmt dabei einen Wert von $\beta = 0,15 \pm 0,005 \mu m^{-1}$ an. Nimmt man diesen Wert als Grundlage und fordert, dass das maximale Aspektverhältnis, welches dieses Glättungsverfahren gestattet, eingehalten wird, wenn die Maximalhöhe eines Stegs mit den Abmessungen $h \times b$ nach der Glättung nicht mehr als 10 % von der Sollhöhe abweicht, kann folgende Rechnung durchgeführt werden. Der Querschnitt eines Stegs wird dabei gemäß Abb. 79 in ein Koordinatensystem gelegt werden. Die Lösungen von Gleichung [7.4] nehmen dabei folgende Form an:

$$f_1(x) = \frac{h}{2} \cdot e^{\beta x} \cdot (1 - e^{-\beta(b-x)}) \quad \text{für } x < 0 \quad [10.1]$$

$$f_2(x) = \frac{h}{2} \cdot ((1 - e^{-\beta x}) + (1 - e^{-\beta(b-x)})) \quad \text{für } 0 \leq x \leq b \quad [10.2]$$

$$f_3(x) = \frac{h}{2} \cdot e^{-\beta x} \cdot (e^{-\beta b} - 1) \quad \text{für } x > b \quad [10.3]$$

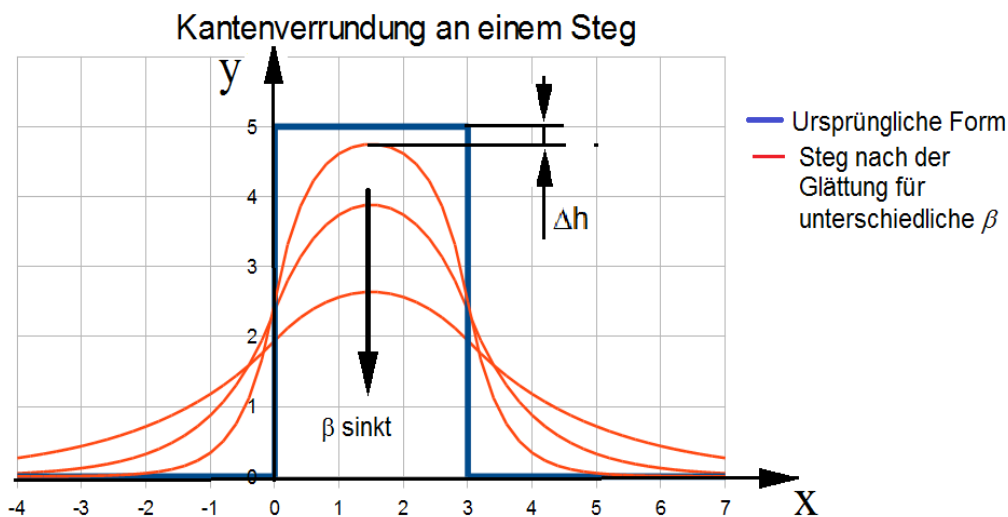


Abbildung 79: Kante der Abmessung $h \times b$

Das Maximum der in Abb. 79 rot dargestellten Funktion befindet sich immer bei $x = b/2$. Gemäß der Forderung gilt für $f_2(x)$ bei diesem Wert:

$$f_2(x) \geq 0,9 \cdot h \leq \frac{h}{2} \cdot ((1 - e^{-\beta \frac{b}{2}}) + (1 - e^{-\beta(b - \frac{b}{2})})) \quad [10.4]$$

Nach dem Umstellen: $0,9 \leq (1 - e^{-\frac{\beta b}{2}})$ [10.5]

Somit gilt für b : $b \geq \frac{-2 \cdot \ln(1 - 0,9)}{\beta}$ [10.6]

Gemäß Definition gilt für das Aspektverhältnisses $A = h/b$, setzt man die Bedingung [10.6] ein, so gilt:

$$A \leq \frac{-h \cdot \beta}{2 \cdot \ln(1 - 0,9)} \quad . \quad [10.7]$$

Bei bekannter Größe β , welche die Glättung charakterisiert, kann mit Formel [10.6] berechnet werden, wie breit ein Steg unabhängig von seiner Höhe mindestens sein muss, damit er nach der Glättung 90 % seiner Ursprungshöhe aufweist. Analoges gilt für eine gleichartig geformte Vertiefung. Dies würde bei einem Wert von $(0,15 \pm 0,005) \mu\text{m}^{-1}$ für β bedeuten, dass eine Struktur mindestens $(30,7 \pm 1) \mu\text{m}$ breit sein muss, was die Erzeugung von Submikrometerstrukturen verhindert. Die einzige Möglichkeit, die minimale Strukturbreite zu verkleinern besteht darin, eine geringere Glättung zuzulassen, was den Wert β erhöht.

Die für die Berechnung der Formeln [10.1] bis [10.3] wurde die Wichtungsfunktion [7.2] zu Grunde gelegt, was eine Näherung ist. Die reale Wichtungsfunktion muss aus der Differenz der Amplituden der Oberflächenwellenlängen vor und nach der Bearbeitung einer aufgerauten Oberfläche, anschließender Rücktransformation der Rekursion und einer Normierung der entstehenden Funktion bestimmt werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die für eine gleichmäßige Glättung einer optischen Oberfläche benötigte Leistung sollte so hoch wie möglich sein, ohne dabei die Glasoberfläche zu zerstören. Damit ergibt sich ein nur sehr schmales Parameterfenster für die Laserbehandlung. Alle Leistungsschwankungen sind so gering wie möglich zu halten. Dies kann unter Verwendung einer Leistungsstabilisierung für den Laser und einer In-Situ-Temperaturüberwachung der Glasoberfläche mittels Pyrometer und Kenntnis der materialspezifischen Verdampfungstemperatur schneller und effizienter erreicht werden. Der unter 3.2.2. aufgeführte Aufbau kann unter Verwendung eines Masterrechners gut in eine geschlossene industrielle Prozesskette integriert werden.

Für die Nachbehandlung von mikrostrukturierten DOEs gilt, dass die Substruktur beseitigt werden kann und die mittlere Oberflächenrauheit reduziert werden kann. Das mögliche Aspektverhältnis, beziehungsweise die minimalen Abmessungen der Struktur, welches dieses Verfahren zulässt, wird durch den Effekt der Kantenverrundung beschränkt. Dieser ist sowohl eine verfahrensbedingte als auch eine mathematische Konsequenz und kann unter keinen Umständen verhindert werden. Die flüssigkeitsdynamischen Prozesse führen einerseits zu einer Glättung von Rauheiten, beeinflussen andererseits aber auch die eigentliche Oberflächenstruktur negativ. Eine analoge Betrachtung wäre der Versuch, ein breitbandiges Rauschen allein mit einem Tiefpass von einem Signal zu entfernen.

Prinzipiell kann die thermische Laserglättung auf alle Gläser angewendet werden. In weiterführenden Untersuchungen können, mit den in dieser Arbeit erläuterten Verfahren und Gleichungen, schnell die nötigen Prozessparameter herausgefunden werden. Der Glättungserfolg hängt für andere Materialien davon ab, wie niedrigviskos die Schmelze werden kann (s. Kap 2.2.). Ob sich thermisches Laserglätten auch auf kristalline Materialien wie CaF_2 anwenden lässt, könnte ebenfalls untersucht werden. Es ist allerdings zu erwarten, dass bei der Abkühlung eine unterkühlte Schmelze entsteht, wodurch die optischen Eigenschaften des Kristalls verloren gehen.

Literaturverzeichnis

- [BER] Bertram, Renè : „Fluorlaser-Mikrobearbeitung von ausgewählten Materialien“. -2009. -S 12, Mittweida, University of applied science, Fakultät MNI, Diplomarbeit, 2009
- [BLI] Bliedtner, Jens; Gräfe, Günter: „Optiktechnologie Grundlagen-Verfahren-Anwendungen-Beispiele“. 2. aktualisierte Auflage. Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2010, S. 169-217
- [BRO] Brockman, Ulrike; Hülsenberg, Dagmar...: „Glas in der Mikrotechnik“. Präsentation der TU Ilmenau, Fachgebiet Mikromechanische Systeme. Juni 2006
- [BUT] Butz, Tilman: „Fouriertransformation für Fußgänger“. 3. Auflage. G.B. Teubner Verlag Wiesbaden 2003
- [DAI] Daisdanidou, Krystalini: „Diffraktive optische Elemente“, Vortrag 2007
- [EIC] Eichler, Jürgen: „Laser Grundlagen – Systeme – Anwendungen“. 2. aktualisierte Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1991
- [FEH] „Bedienungsanleitung für CO₂-Laser der SM Baureihe“. Feinmechanische Werke Halle GmbH, Bereich Lasertechnik. Mai 1998
- [GRO] Groß, Albrecht: „Ultraschall-Erosion Stand der Technik Zukunftschancen“. Datum des Auffindens: 01.08.2011
- [HÄN] Hähnel, Falk: Mikrostrukturierung mittels Fluorlaser, Diplomarbeit 2006 Mittweida
- [HIE] Hiersig, Heinz M.: „Lexicon Maschinenbau“. 1. Auflage. VDI – Verlag GmbH, Düsseldorf 1995
- [ILT 1] Richmann, Annika: „Laserpolishing of glass and plastics“, Fraunhofer ILT, Vortrag World of Photonics Congress, München 2011

- [ILT 2] Richmann, Annika, Wissenbach; Willenborg, Edgar, Dr.: „Laserpolishing of fused silica“, Aachen, RWTH Lehrstuhl für Technologie Optischer systeme, Bericht
- [ILT 3] Richmann, Anika; Wissenbach, Konrad: „Laserpolieren von Optiken aus Glas und Kunststoff“, Fraunhofer ILT, Veröffentlichung Juni 2010
- [ITM] Wengert, Nicolai: „Simulationsbasierte Untersuchung der Dynamik von Hochleistungsobjektiven“. Institut für technische und mechanische Numerik, Stuttgart, 04.05.2011
- [KIE] Vortrag 12 aus „Physik 2“: „Beugungsintergal“, Universität Kiel, Institut für Experimentelle und angewandte Physik, 2011
- [NYT] New York Times: „Theodore Maiman dies at 79“ Artikel vom 11.05.2007
- [LPF] „User Manual LPF 200“. Lambda Physik AG. 37079 Göttingen. September 2000
- [MAC] R.G. Mace: „Glühen von Quarzglas“. Application Engineering, General Electrics Quarz. Inc. Februar 2000
- [PAP] Papula, Lothar: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 2“. 10. Auflage. Viewegs Fachbücher für Technik, Braunschweig. Oktober 2001
- [STA] Stankovic, Sventomir: „Diffraktive Optische Elemente für moderne mikrooptische Systeme“. -21.05.2002, Darmstadt, Technische Universität Fachbereich Physik, Dissertation, 2002
- [SYN] „Synrad series 57/60 operation and service manual“. Synrad, Inc. 6500 Harbour heights Parkway, Mukilteo. Januar 1997
- [WIE] Wiechel, Peer-Olrik: „Thermisches Glätten optischer Glasoberflächen mittels CO₂-Laserstrahlung und Mikrowellenstrahlung“ 1. Auflage. Grabsen: PHZ, Produktionstechnisches Zentrum. Dissertation Universität Hannover 2006

- [ZEI] Gross, Herbert: „Diffraktive Optik“, Präsentation der Carl Zeiss AG zum Thema Forschung und Technologie: Optikdesign, 05.04.2004

Anhang

Anlage 1

Faktor Leistung [%]	realer Messwert	Pav-real	Pav - Theoretisch
0	6,5	0	0
1	6,5	0	1,46
2	6,5	0	2,91
3	7	0,5	4,37
4	8,5	2	5,82
5	10,5	4	7,28
7	15	8,5	10,19
10	22	15,5	14,55
15	29	22,5	21,83
20	37	30,5	29,1
25	45	38,5	36,38
30	57	50,5	43,65
35	72	65,5	50,93
40	86	79,5	58,2
45	96	89,5	65,48
50	102	95,5	72,75
55	110	103,5	80,03
60	114	107,5	87,3
65	122	115,5	94,58
70	128	121,5	101,85
75	136	129,5	109,13
80	140	133,5	116,4
85	144	137,5	123,68
90	148	141,5	130,95
95	150	143,5	138,23
100	152	145,5	145,5

Anlage 2

Test-DOE1						
Fläche 1						
vor						
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	131	151	89	87	60	75
	280	143	138	110	92	34
	167	146	135	81	73	43
	234	157	114	147	69	62
	391	133	147	120	74	92
		247	355	92	60	45
			130	162	53	42
			184	174	123	49
			213	101	57	42
			245	97	51	50
Mittelwert [nm]	240,6	162,83	175	117,1	71,2	53,4
Stabw [nm]	102,04	42,01	78,68	32,84	21,92	17,88

Test-DOE1 Fläche 2 vor

Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	425	354	336	246	96	86
	615	372	386	183	71	75
	657	380	368	335	62	31
	638	530	428	116	188	59
	464	490	345	215	64	43
		482	442	95	61	54
			229	133	102	97
			290	257	77	125
			337	256	199	49
			488	232	82	60
Mittelwert [nm]	559,8	434,67	364,9	206,8	100,2	67,9
Stabw [nm]	107,19	74,58	75,74	74,81	51,12	28,2

Test-DOE2
Fläche 1 vor

Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	191	190	75	62	32	17
	151	114	96	179	38	30
	169	110	137	85	89	64
	136	132	160	148	59	45
	180	202	120	88	47	43
	198	170	122	207	31	33
	111	101	72	118	53	21
			219	87	52	33
			192	73	56	32
			88	112	43	28
Mittelwert [nm]	162,29	145,57	128,1	115,9	50	34,6
Stabw [nm]	31,38	41,21	49,61	47,89	16,79	13,39

Test-DOE2
Fläche 2 vor

Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	419	283	272	306	149	51
	36	282	274	292	62	181
	339	327	215	146	160	56
	466	420	210	160	66	95
	354	410	353	263	77	75
			171	269	90	87
				134	63	212
				218	154	48
				174	213	56
				189	119	40
Mittelwert [nm]	322,8	344,4	249,17	215,1	115,3	90,1
Stabw [nm]	168,26	67,05	64,39	63,37	51,97	59,18

Anlage 3

Bearbeitungstyp	ÜLP []	v [mm/s]	p[μm]	Bereich für fl [%]		Bereich P [W]	
				untere	obere	untere	obere
I	0,99	14	10	-	-	-	-
II	0,95	70	10	7,5	8,5	9,67	12
III	0,9	140	30	19	21	28,9	32,1
IV	0,85	210	40	28	30	45,7	50,5
V	0,8	280	60	32	34	53,3	60,1
VI	0,75	350	70	40	42	79,5	83,5
VII	0,7	420	80	43	45	85,5	89,5
VII.1	0,64	500	100	45	50	89,5	95,5
VIII	0,6	560	110	47	49	91,9	94,3
IX	0,5	700	140	57	65	105,1	115,5

Anlage 4

Aufgeraute Oberfläche

Messlänge [μm]:	50	100	300	500	1000
	330	172	477	316	401
	113	220	397	432	283
	138	316	317	277	298
	186	264	293	266	287
	99	351	303	291	344
	273	169	280	271	
	205	439	319	259	
	170	282	261	283	
	181	430			
	137	215			
Mittelwert [μm]	183,2	285,8	330,88	299,38	322,6
STABW [μm]:	71,86	97,67	71,46	56,38	50,11

Anlage 5

12 W (blau) 3 GÜF

Messlänge [μm]:	50	100	300	500	1000
	3	74	171	270	230
	50	32	160	142	200
	40	76	160	183	332
	30	160	137	214	260
	18	126	185	460	249
	88	57	162	158	315
	63	32	106	143	273
	50	168	398	176	256
	32	63			
	34	53			
Mittelwert [μm]	40,8	84,1	184,88	218,25	264,38
STABW [μm]:	23,76	49,78	89,35	106,42	42,87

12 W (blau) 10 GÜF

Messlänge [μm]:	1000	750	500	300	100	50
	245	241	115	120	79	63
	244	225	146	98	83	14
	307	220	160	80	57	16
	326	324	250	115	46	18
	190	238	124	240	53	12
				197	71	14
				94	30	37
				256	71	3
				158	52	33
					55	7
Mittelwert [μm]	262,4	249,6	159	150,89	59,7	21,7
STABW [μm]:	54,58	42,5	53,88	65,64	16,24	17,93

10 W (rot) 3 GÜF

Messlänge [μm]:	1000	750	500	300	100	50
	500	327	514	427	206	242
	354	527	375	309	350	246
	514	507	322	370	311	103
	525	341	352	316	490	138
	425	485	466	347	199	222
		500	552	314	156	257
		403	556	378	224	95
		425	443	389	449	92
		505	396	371	271	207
		356	450	238	260	97
Mittelwert [μm]	463,6	437,6	442,6	345,9	291,6	169,9
STABW [μm]:	72,69	76,79	81,66	53,33	109,65	70,83

10 W (rot) 10 GÜF

Messlänge [μm]:	1000	750	500	300	100	50
	413	411	430	368	91	119
	405	433	385	344	149	56
	385	327	274	204	263	143
	416	415	281	277	151	65
	261	431	348	333	149	175
	294	263	427	302	208	111
			472	311	224	124
			319	306	259	66
			179	196	155	91
			328	422	202	146
Mittelwert [μm]	362,33	380	344,3	306,3	185,1	109,6
STABW [μm]:	67,41	69,42	87,78	69,01	55,16	39,62

Anlage 6

Test-DOE1 Fläche 1						
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	131	151	89	87	60	75
	280	143	138	110	92	34
	167	146	135	81	73	43
	234	157	114	147	69	62
	391	133	147	120	74	92
		247	355	92	60	45
			130	162	53	42
			184	174	123	49
			213	101	57	42
			245	97	51	50
Mittelwert [nm]	240,6	162,83	175	117,1	71,2	53,4
Stabw [nm]	102,04	42,01	78,68	32,84	21,92	17,88

Test-DOE1 Fläche 1						
Nach 3 GÜF						
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	93	75	32	30	12	9
	169	78	30	37	24	12
	90	81	43	62	28	27
	72	79	49	25	17	23
	67			36	27	25
	71			45	13	6
				31	14	5
					21	17
					26	25
					16	9
Mittelwert [nm]	93,67	78,25	38,5	38	19,8	15,8
Stabw [nm]	38,43	2,5	9,04	12,33	6,14	8,61

Test-DOE1 Fläche 1						
Nach 10 GÜF						
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	97	77	35	26	31	10
	59	40	28	12	19	9
	67	75	39	18	15	7
	87	87	39	38	16	13
	86	51	57	33	10	7
	70	55	19	29	13	12
				24	22	9
				16	14	8
				30	20	12
				43	18	8
Mittelwert [nm]	77,67	64,17	36,17	26,9	17,8	9,5
Stabw [nm]	14,5	18,14	12,75	9,79	5,85	2,17

Anlage 7

Test-DOE1 Fläche 2 vor						
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	425	354	336	246	96	86
	615	372	386	183	71	75
	657	380	368	335	62	31
	638	530	428	116	188	59
	464	490	345	215	64	43
		482	442	95	61	54
			229	133	102	97
			290	257	77	125
			337	256	199	49
			488	232	82	60
Mittelwert [nm]	559,8	434,67	364,9	206,8	100,2	67,9
Stabw [nm]	107,19	74,58	75,74	74,81	51,12	28,2

Test-DOE1 Fläche 2 Nach 3 GÜF						
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	736	544	408	440	78	47
	714	489	307	138	60	51
	207	173	180	103	65	43
	436	415	424	116	83	47
	348	367	274	192	89	34
					71	35
					79	26
Mittelwert [nm]	488,2	397,6	318,6	197,8	75	40,43
Stabw [nm]	231,22	142,72	100,54	139,6	10,21	8,98

Test-DOE1 Fläche 2 Nach 10 GÜF						
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	334	268	260	175	85	38
	489	469	427	106	38	30
	430	348	240	188	78	40
	776	492	369	356	117	71
	453	419	378	368	83	31
	461	275	260	264	81	16
				97	75	35
				402	57	62
					68	28
					64	28
Mittelwert [nm]	490,5	378,5	322,33	244,5	74,6	37,9
Stabw [nm]	149,63	96,5	78,46	120,61	20,64	16,58

Anlage 8

Test-DOE2						
Fläche 1			vor			
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	191	190	75	62	32	17
	151	114	96	179	38	30
	169	110	137	85	89	64
	136	132	160	148	59	45
	180	202	120	88	47	43
	198	170	122	207	31	33
	111	101	72	118	53	21
			219	87	52	33
			192	73	56	32
			88	112	43	28
Mittelwert [nm]	162,29	145,57	128,1	115,9	50	34,6
Stabw [nm]	31,38	41,21	49,61	47,89	16,79	13,39

Test-DOE2						
Fläche 1			Nach 3 GÜF			
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	198	139	136	108	28	23
	140	123	114	150	25	9
	117	62	131	114	22	6
	115	175	98	154	52	12
	247	126	114	48	53	20
	169	79	63	53	47	5
	122	127	45	43	46	22
			198	83	29	14
			186	44	23	17
			113	39	24	12
Mittelwert [nm]	158,29	118,71	119,8	83,6	34,9	14
Stabw [nm]	49,65	37,67	47,49	45,09	12,9	6,39

Test-DOE2						
Fläche 1			nach 10 GÜF			
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	58	59	55	54	13	7
	49	47	57	52	17	7
	55	55	48	46	35	12
	41	37	46	33	16	17
	48	46	59	40	13	13
	80	76	48	47	16	6
			30	40	11	5
			49	54	18	14
			44	47	25	21
			53	34	11	7
Mittelwert [nm]	55,17	53,33	48,9	44,7	17,5	10,9
Stabw [nm]	13,53	13,49	8,25	7,7	7,4	5,36

Anlage 9

Test-DOE2 Fläche 2						
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	419	283	272	306	149	51
	36	282	274	292	62	181
	339	327	215	146	160	56
	466	420	210	160	66	95
	354	410	353	263	77	75
			171	269	90	87
				134	63	212
				218	154	48
				174	213	56
				189	119	40
Mittelwert [nm]	322,8	344,4	249,17	215,1	115,3	90,1
Stabw [nm]	168,26	67,05	64,39	63,37	51,97	59,18

Test-DOE2 Fläche 2						
nach 3GÜF						
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	198	125	159	134	126	50
	211	181	222	268	101	29
	212	171	174	177	38	74
			158	125	237	13
				107	46	22
				109	48	65
					80	24
					117	55
					140	37
					18	12
Mittelwert [nm]	207	159	178,25	153,33	95,1	38,1
Stabw [nm]	7,81	29,87	30,07	61,64	64,71	21,84

Test-DOE2 Fläche 2						
Nach 10 GÜF						
Messlänge l [μm]	1000	750	500	300	100	50
	171	152	158	197	58	6
	203	116	153	100	31	23
	212	159	135	115	51	11
		181	141	48	34	12
				94	22	13
				110	54	8
				132	55	16
				97	80	19
Mittelwert [nm]	195,33	152	146,75	111,63	48,13	13,5
Stabw [nm]	21,55	26,99	10,59	42,13	18,43	5,63

Anlage 10

Feld 1		$T_{\max} = 2047\text{ °C}$		
Messlänge [μm]	50	100	300	500
	1,2	2,1	12	26
	1,2	2,1	9,9	32
	1,6	5,7	32	14
	2	4,4	21	38
	1,5	1,4	7,5	
	1,5	1,4	10,5	
	1,2	1,2	10,2	
	1,6	2,2	9	
	1,1	1,8		
	1,2	2,5		
Mittelwert [nm]:	1,41	2,48	14,01	27,5

Feld 2		$T_{\max} = 1995\text{ °C}$		
Messlänge [μm]	50	100	300	500
	2,6	3,2	28,8	44
	1,2	8,8	40,8	47,8
	1,3	1,8	34,7	63,7
	3,7	6,1	48,2	31,2
	1,5	4,4	34,7	
	1,3	4	25,3	
	1,2	13,7	84,7	
	3,7	3,3	19,8	
	1,4	9,4		
	1,6	10,4		
Mittelwert [nm]:	1,95	6,51	39,63	46,68

Feld 3		$T_{\max} = 1760\text{ °C}$		
Messlänge [μm]	50	100	300	500
	50	66	116	107
	65	67	88	196
	45	112	113	127
	29	54	241	
	92	69	100	
	103	138	147	
	36	73		
	46	132		
	54,9	97		
	27			
Mittelwert [nm]:	54,79	89,78	134,17	143,33

Feld 4		$T_{\max} = 1885\text{ °C}$		
Messlänge [μm]	50	100	300	500
	12,2	22,6	26,9	53
	28,9	16,5	54,3	103
	27,5	29,5	100,6	85,3
	25,3	93,9	85	
	6,6	47	55,8	
	19,3	44,8	85,6	
	16,2	44,5		
	12,6			
Mittelwert [nm]:	18,58	42,69	68,03	80,43

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Mittweida, den 01.11.2011

Alexander Kratsch